كيف تعمل الأشياء:

فيزياء الحياة اليومية

المؤلف

لويس أ. بلومفيلد

ترجمة

ريم محمد أبوراس الطويرقي

مركز النشر العلمي

جامعة الملك عبد العزيز

ص ب: ٨٠٢٠٠ - جدة: ٢١٥٨٩

المملكة العربية السعودية

http://spc.kau.edu.sa

الطبعة الأولى: ١٤٣٢هـ (٢٠١١م)

جامعة الملك عبدالعزيز، مركز النشر العلمي، ١٤٣٢هـ

فهرسة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

بلومفيلد ، لويس

كيف تعمل الاشياء : فيزياء الحياة اليومية . / لويس بلومفيلد،

ريم محمد الطويرقي - جدة ١٤٣٢هـ

.. ص ؛ .. سم

ردمك: ٥-٠٩١-٠٦-٩٩٦٠-٩٧٨

١- الفيزياء ٢ - الثقافة أ- الطويرقي ، ريم محمد (مترجم)

ب - العنوان

ديوي ٥٣٠ ١٤٣٢/٩٢٣٤

رقم الإيداع: ١٤٣٢/٩٢٣٤

ردمك: ٥-٠٩١-٠٦-٩٩٦٠-٩٧٨

مطابع جامعة الملك عبدالعزيز

شكر المترجم

إن المكتبة العربية تفتقر لكتب الفيزياء التي تظهر دور هذا العلم العظيم في حياتنا اليومية، وتبسط مفاهيمه، وتقدمه بطريقة مثيرة للقارئ. من هنا كان اختيار هذا الكتاب لترجمته للغة العربية، حيث يعد متميزا عن باقي كتب الفيزياء التقليدية، راجين أن تكون النسخة العربية مرجعا يروي فضول القارئ العربي، سواء كان مختصا في الفيزياء أو مهتما بكيفية عمل الأشياء، ويثيره لطلب المزيد من العلم وينير فكره ويحفزه على الإبداع.

إن القيام بترجمة هذا الكتاب لم يكن بالأمر السهل، ولكن بعون الله سبحانه وتعالى وتوفيقه وتيسيره أنجز هذا العمل، فلله الشكر والفضل والمنّة. وعلمنا معلمنا وقدوتنا رسول الله، صلى الله عليه وسلم، أنه من لا يشكر الناس لا يشكر الله، لذا وجب شكر مجموعة من الأشخاص كان لهم دوراً كبيراً في دعم ترجمة هذا الكتاب وإخراجه بالصورة المشرفة التي بين أيديكم.

فالشكر لطالبتي السيدة آسية مهمت أكيورت على مراجعتها الترجمة مراجعة دقيقة وعملها المتفاني طوال رحلة الترجمة. كما أشكر والدي الحبيب والذي لم يألوا جهدا لتسهيل عملي خلال ترجمة هذا الكتاب من تحرير النصوص الكترونيا. والشكر أيضا للسيدة ألاء كوسا على عملها في إخراج الكتاب بشكله الجذّاب وعملها المضني للتأكد على خلوه من الأخطاء المطبعية. كما أشكر السيدة حصة الفايز والسيدة رضية النهدي والسيدة نور الهدى الدرويش على مراجعتهم النسخة النهائية من الترجمة.

وإن كانت كلمات الشكر لن تفيهم حقهم، إلا أن شكري موصول لوالدتي الحبيبة ولوالدي الحبيب وأفراد أسرتي على توفيرهم كل وسائل الدعم لي خلال رحلة ترجمة هذا الكتاب وأدعو الله أن يثيبهم ويجزيهم عني خير الجزاء.

كما أشكر جامعة الملك عبد العزيز، متمثلة بعمادة البحث العلمي على دعمها هذا المشروع، وأشكر مركز النشر العلمي بالجامعة لتبنيه نشر وطباعة الكتاب.

وأخير وليس آخرا، أشكر القارئ الكريم على اختياره لهذا الكتاب وأتطلع لما يود تزويدي به من ملاحظات حوله.
أدعو الله، العليم الكريم، أن يجعل هذا الكتاب علما نافعا وعملا متقبلا.

المترجمة

ريم بنت محمد أبوراس الطويرقي

شكر المؤلف

لم أكتب هذا الكتاب من فراغ، بل تطلب الإعداد له مساعدة العديد من الأشخاص الرائعين، والذين أمتنّ لهم كثيرا. أولهم محرّري، ستوارت جونسون، والذي يستمر حماسه لهذا المشروع بدون خبو بعد تقريبا عقد من الزمان. كما أسعدني العمل بشكل يومي تقريبا مع جيرالدين أوسناتو أثناء عملية تطوير الكتاب، ومع سارة ولفمان-روبيتشاود أثناء إنتاجه؛ لن أستطيع أن أجد معاونين ألطف وأكثر تشجيعاً منهما. لقد صمّم هاري نولان بنية جميلة لهذا الكتاب، ووجدت تارا سانفورد صوراً رائعة، وقامت كل من ساندرا ريغبي وجولي هوران بعمل مدهش مع الرسومات التخطيطية، وقامت كوني باركس بالنظر بأعين الصقر لإيجاد أخطائي قبل أن تصل للمطبعة. شكرا لدانا كازويتز وماثيو بريتزويش لمساعدتهم لي في تعلّم ما يريده المعلمون والطلبة من هذا الكتاب، ولأماندا ويغل لمساعدتها في التخطيط للكتاب وتنسيق متناثره، ولكريستا جارماس وألي رينتروب لمساعدتهم على طول الطريق. شكراً أيضاً لأسرتي، كارين، وإلانا وأرون بلومفيلد لمساعدتهم لي في كل شيء من تحرير النص إلى مناقشة الموجات الموقوفة إلى تصوير الكؤوس الزجاجية.

مازلت أستمتع بمساعدة هائلة من زملاء هنا وهناك ساندوا مفهوم كيف تعمل الأشياء، وناقشوه معي، وكثيراً ما درّسوا المقرر أنفسهم. من ضمن هؤلاء الموجودين في جامعة فرجينيا باسكوم ديفر، ومايكل فاولر، وتوم غالاغر، وبوب جونز، وريتشارد ليندغرن، وديسبينا لوكا، وريك مارشال، وروب واتكنز، وفي معاهد أخرى ج. روبرت أندرسون، ونورا بيره، وكايتي ديزني، وأورسولا جيبسون، ولورا غرين، وروبرت هوبل، ولاري هونتر، وإدوين جونز، وجوليان كروليك، وجون كروبكزاك، ولورا ليسنغ، وألان نايتل، ومايك نويل، وديفيد أوليس، وبرومود براتاب، وتشك ستون، وريتشارد سوبرفاين، وكريستن ويدنج، وبوب ويلش، وكارل وايمان. وأنا ممتن على وجه الخصوص لكارل وايمان لتقديمه لهذا الكتاب موضحا فيه رؤيته في طريقة فهم الفيزياء وتعلمها لتكون في متناول الجميع وذات قيمة لهم.

خلف الكواليس في داخل فصلي الدراسي، كان هناك دائما فريق موهوب من العارضين للتجارب وفنيين بالحاسب الآلي وبدون إبداع وجهد وطاقة كل من مايك تيمنز، وجون مالون، وروجر ستاتون، وأتسوشي يوشيدا، وبرايان رايت، فإن كلاً من طرق تدريسي والصور الفوتوغرافية في هذا الكتاب كانت ستكون أقل إثارة.

لا شيء يعلّم تدريس العلوم مثل البحث العلمي النشط، وأنا ممتن كثيرا لويندي فولر-مورا، ودينس كالدويل، وهوليس ويكمان، وأوما فينكاتسوارن من المؤسسة الوطنية للعلوم (National Science Foundation) لدعمهم الثابت لدراساتي العلمية.

لكن أفضل طريقة لاكتشاف كيفية تَعلّم الطلبة للعلوم، هي أن تقوم بتدريسها. أنا ممتن جدا للطلبة في جامعة فرجينيا لتلهفهم وحماسهم وتفاعلهم في هذه التجربة التعليمية الطويلة. لقد كان سعادة وشرفاً لي معرفة العديد منهم بصفة شخصية ورؤية تأثيرهم الذي لا حدّ له على هذا المشروع.

أخيرا، لقد استفاد هذا الكتاب أكثر استفادة من النقد البنّاء لعدد من المراجعين الموهوبين. بالإضافة إلى الحصول على إحساس أفضل في كيفية تقديم المادة في هذا الكتاب، لقد تعلمت الكثير من الفيزياء من مراجعاتهم، وشكري العميق لكل هؤلاء الأشخاص الرائعين لمراجعتهم الطبعة الثالثة:

تيمثي بولتن – جامعة ولاية كانزاس
دينيس ديوك – CSIT جامعة ولاية فلوريدا
واين جارفر – جامعة ميزوري، ساينت لويس
لورا غرين – جامعة إلونوي أوربانا – شامباين
فراينك هارترانفت – جامعة نيبراسكا في أوماها
جون هوبسز – جامعة ولاية نورث كارولاينا
أدوين جونز – جامعة ساوث كارولاينا
لوي بروير كراوس – جامعة كليمسون
جون كروبزاك – كلية هوب
لويد ماكارويتز – SUNY فرامنغديل
برومود براتاب – جامعة نورث كارولاينا – غرينسبورو
تشك ستون – جامعة ولاية نورث كارولاينا A&T
جون تانيس – جامعة ويسترن ميشيغان
جو زنغ – جامعة بلومزبرغ

لقد شعرت دائما أن الاختبار الحقيقي لهذا الكتاب، وأي مقرر يُدرّس منه، هو تأثيره على حياة الطلبة بعد تركهم مقاعد الدراسة. إن أملي الخالص أن العديد من هؤلاء الطلبة سيجدون أنفسهم ينظرون إلى الأشياء في العالم من حولهم بعد سنوات بفهم وبصيرة لم تكن لديهم قبل لقائهم بهذا الكتاب.

لوي أ. بلومفيلد
شارلوتسفيل، فرجينيا
bloomfield@virginia.edu

تقديم

نحن محاطون في عالم اليوم بالعلوم وبالتقنية التي قد نمت من تلك العلوم. بالنسبة لمعظمنا، هذا يجعل عالمنا أكثر غموضا ومشؤوماً بعض الشيء، بينما تصبح التقنية أقوى من ذي قبل. على سبيل المثال، نواجه العديد من الأسئلة البيئية العالمية، مثل مخاطر غازات الاحتباس الحراري وأفضل الخيارات لمصادر الطاقة. هذه أسئلة لها في الأساس طبيعة تقنية، وهناك تشكيلة مذهلة من الادعاءات والادعاءات المضادة لتحديد ما هي «الحقيقة» فيما يخص هذه القضايا وغيرها من القضايا العلمية المهمة المماثلة. للعديد من الأشخاص، رد الفعل هو رفع الأيدي استسلاما للإحباط وتقبلاً بأن العالم الحديث مستحيل فهمه ولا يسع الإنسان إلا أن يبقى جاهلا في عالم مليء بالغموض وغير قابل للتفسير.

في الواقع، يحكم معظم العالم من حولنا وتقنية حياتنا اليومية القليل من المبادئ الفيزيائية الأساسية، وعند فهم هذه المبادئ يصبح العالم والتقنية الشاسعة في حياتنا مفهومة ويمكن التنبؤ بها. كيف يسخّن فرن المايكروويف طعامك؟ لماذا يكون استقبال مذياعك سيئاً في بعض الأماكن مقارنة بأماكن أخرى؟ ولماذا تستطيع الطيور أن تهبط بسعادة على الأسلاك الكهربائية ذات الفولطية العالية؟ الإجابات على مثل هذه الأسئلة بديهية عند معرفتك بالفيزياء المرتبطة بها. من المؤسف أنه من غير المحتمل أن تتعلّم ذلك من مقرر فيزياء أو كتاب تدريس فيزياء اعتيادي. هناك الكثير من الأبحاث التي تُظهر أنه بدلا من توفير هذا الفهم المتطوّر لحياتنا اليومية، فإن معظم مقررات مدخل الفيزياء تقوم بعكس ذلك. على الرغم من مقاصد المعلمين الجيّدة، إلا أن معظم الطلبة «يتعلّمون» أن الفيزياء مجرّدة، وغير مثيرة، وغير مرتبطة بالعالم من حولهم.

كتاب كيف تعمل الأشياء هو خطوة مثيرة نحو تغيير ذلك من خلال تقديم الفيزياء بطريقة جديدة. بدلا من البدء بمفاهيم مجرّدة تترك القارئ بانطباع حول الفيزياء بأنها أفكار زائفة وغير مثيرة، يبدأ لوي بلومفيلد بالحديث عن أشياء وأجهزة حقيقية نواجهها في حياتنا اليومية. يوضّح بلومفيلد بعدها كيف أن هذه الأجهزة التي قد تبدو سحرية يمكن فهمها بدلالة المبادئ الفيزيائية الأساسية التي تحكم سلوكها. هذه هي الطريقة التي تم اكتشاف معظم الفيزياء بها في المقام الأول؛ تساءل الناس لماذا تصرّف العالم من حولهم بمثل تصرفه ونتيجة لذلك اكتشفوا المبادئ التي فسّرت وتنبأت ما شاهدوه.

لي عدة سنوات وأنا أستخدم هذا الكتاب في محاضراتي ومازلت معجبا بكيفية قيام لوي بأخذ أجهزة عالية التعقيد ونزع تعقيدها ليبين كيف أن في لبّها أفكار فيزيائية بسيطة. بفهم هذه الأفكار، يمكن بعد ذلك استخدامها لفهم سلوك الكثير من الأجهزة التي نواجهها في حياتنا اليومية، وكثيراً حتى لإصلاح هذه الأجهزة التي كانت تبدو عالية التعقيد. أثناء تدريسي من هذا الكتاب، ازداد فهمي للفيزياء التي تقع خلف معظم العالم من حولي. في الواقع، بعد استخدامي لكتاب كيف تعمل الأشياء، وجدت الثقة لمواجهة كلٍّ من السباكين ومصلحي مكيفات الهواء لإخبارهم (بشكل صحيح) بأن تشخيصهم ليس منطقيا ويحتاجون للقيام بشيء مختلف لتصليح مشاكلي مع السباكة ومكيفات الهواء. الآن أتسلى بصفة دائمة بمعرفة المعتقدات الخاطئة التي عند المتخصصين في الفيزياء حول بعض الفيزياء التي يواجهونها في حياتهم اليومية، مثل كيفية عمل فرن المايكروويف ولماذا يمكن صناعته من جدران معدنية ولكن وضع غطاء ألومنيوم داخله ليس جيّداً. لقد أقنعني ذلك بأننا يجب أن نأخذ الطريقة المستخدمة في هذا الكتاب في العديد من كتبنا العلمية.

بالطبع، أهم أثر هو على الطلبة في محاضراتي التي تستخدم هذا الكتاب. في العادة هم طلبة غير متخصصين في العلوم ويدرسون في مجالات مثل الأفلام، والآداب، والأدب الانجليزي، وإدارة الأعمال، الخ. في الغالب يأتون للفيزياء بخوف شديد. من المثير رؤية الكثير منهم يندهشون لاكتشافهم أن الفيزياء مختلفة تماما عمّا كانوا يعتقدون – أن الفيزياء يمكنها في الحقيقة أن تكون مثيرة ومفيدة وتجعل العالم أقل غموضا وأكثر فهما. أذكر العديد من الأمثلة لرؤية حدوث ذلك: الطالب الذي بعد تعلّمه كيفية عمل السمّاعات والتلفاز، فجأة أصبح قادرا على فهم أن تشويش صورة التلفاز عند وضع سمّاعات كبيرة بجواره ليس سحرا ولكنه في الحقيقة فقط فيزياء، والآن عرف كيف يُصلح ذلك؛ والمرأة الغوّاصة التي بعد أن تعلمت عن الضوء والألوان فجأة قاطعت الفصل لتُعلن أنها الآن فهمت لماذا من الممكن معرفة عمقك في الماء من خلال رؤية اللون الذي يظهر به جراد البحر؛ أو الطلبة الذين أعلنوا أنه فجأة بدى لهم منطقيا أن مروش الطابق الأول في السكن الطلابي تعمل بشكل أفضل من مروش الطابق الثاني. إضافة لذلك، الكل يتحمس بالطبع لمعرفة كيفية عمل فرن المايكروويف، ولماذا هناك قوانين غريبة لما يمكنك أن تضع داخله وما لا يمكنك. هذه الأمثلة مثيرة خاصة للمعلم، لأنها تخبرك أن الطلبة ليس فقط يتعلمون المادة المقدمة في الفصل، بل هم قادرون بعدها على تطبيق ذلك الفهم على حالات جديدة بشكل مفيد، الشيء الذي نادرا ما يحدث في مقررات العلوم.

سواء كان شخصا عاديا له فضول، أو مختصاً في الفيزياء، أو طالباً مبتدئاً في الفيزياء، سيجد الجميع تقريباً أن قراءة هذا الكتاب مثيرة ومنيرة، وسيبقى بشعور مريح لمعرفة أن العالم ليس غريبا وغير قابل للتفسير إطلاقا.

كارل وايمان

حاصل على جائزة نوبل في الفيزياء لعام ٢٠٠١

حاصل على جائزة CASE/Carnegie ولقب أستاذ العام في الجامعات الأمريكية لعام ٢٠٠٤

مقدمة

هذا الكتاب هو مقدمة غير تقليدية للفيزياء والعلوم تبدأ بالأشياء الكاملة وتنظر بداخلها لمعرفة ما الذي يجعلها تعمل. كُتب هذا الكتاب للطلبة الذين يسعون لمعرفة الارتباط بين العلوم والعالم الذي يعيشون فيه. برغم أن بعض الطلبة لا يرغبون في دراسة العلوم بشكل تجريدي، إلا أنهم يظهرون حماساً شديداً لهذه الدراسة عند تقديمها في سياق شيق. العديد من الطلبة الذين قمت بتدريسهم خلال الخمس عشرة سنة الماضية والذين يقدر عددهم بـ 7500 طالب تفاجئوا باهتمامهم بالمادة، وتطلعوا إلى حضور الحصص، وسألوا أسئلة ذكية، وقاموا بتجارب بأنفسهم، ووجدوا أنفسهم يفسرون لأسرهم وأصدقائهم كيفية عمل الأشياء المحيطة بهم في عالمهم.

يأتي كتاب "كيف تعمل الأشياء" بالعلم للقارئ غير المختص. فمثل المقرر الذي تطور فيه، فإن هذا الكتاب كان دائما لغير المختصين وتم تأليفه بأخذ ما يهمهم من مواضيع في الاعتبار. ومع ذلك، جذب هذا الكتاب طلبة من العلوم، والهندسة، والعمارة، ومجالات تقنية أخرى والذين يرغبون في وضع المفاهيم العلمية في سياق عملي يلمس الحياة بشكل مباشر.

تغييرات في الطبعة الثالثة

تغييرات المحتوى

• **إعادة تنظيم الأبواب والفصول.** في حين من الممكن دراسة جميع الفيزياء في شيء واحد، إلا أن معظم الأشياء توضّح جانباً معيّناً من الفيزياء بشكل أفضل. بدلا من النظر لقضايا فيزيائية عديدة ومتفاوتة، فإني أركّز الآن على استكشاف الفيزياء التي يظهرها الشيء بشكل أفضل. النتيجة هي نقاش أكثر سلاسة وأكثر تجانسا، مع القليل من الاستطرادات أو الانتقالات الحادة. إن الحصول على تركيز ثابت تطلب مني إعادة ترتيب الأشياء بشكل طفيف وفصلها في ستة عشر فصلاً بدلا من الفصول الأربعة عشر التي كانت في الطبعة الثانية.

• **معاملة الصيغ الفيزيائية بشكل متساوٍ أكثر.** على الرغم من أن هذا الكتاب هو عن المفاهيم في المقام الأول، إلا أنه يحتوي على قدر كافٍ من المعادلات الفيزيائية لإظهار أنه يمكن للفيزياء أن تقوم بتنبؤات دقيقة وكمية عن العالم من حولنا. حتى غير المختص العلمي قد يجد هذه المعادلات مفيدة من وقت لآخر. في حين كانت الطبعة الثانية غير متوازنة في تقديم معادلات لبعض المفاهيم الفيزيائية التي قدمتها، إلا أن الطبعة الثالثة أكثر انتظاماً في هذا الخصوص، القراء غير المهتمين بالفيزياء الحسابية يمكنهم بشكل مأمون إهمال معظم هذه المعادلات.

• **تغطية أوسع لمفاهيم الفيزياء.** لا يمكن ولا ينبغي لأي كتاب واحد أن يُغطّي جميع الفيزياء، لكن الطبعة الثانية أغفلت العديد من الأمور. توفّر هذه الطبعة تغطية جديدة ومطوّرة لبعض القضايا الفيزيائية المهمة، تشمل أطوار المادة وتحولات الطور، والموجات الميكانيكية، والفيزياء الكميّة، وفيزياء الجوامد والتركيب الذري، والرؤية، والإشعاعية، وعمر النصف، والنسبية.

معظم كتب الفيزياء تطوّر مبادئ الفيزياء أولا ثم تقدّم أمثلة واقعية لهذه المبادئ على مضض، إن قامت بذلك في الأصل. هذا الأسلوب في التدريس مجرّد وغير مؤثر، ويوفّر القليل من المفاهيم التي يمكن أن يرتكز عليها الطلبة، بينما يعانون من محاولة فهم مبادئ غير مألوفة. على كل، الراحة الناتجة عن الخبرة والحدس تكمن في الأمثلة، وليس في المبادئ. في حين قد يكون التطوّر المنهجي والمنطقي للمبادئ العلمية مُرضياً لبعض العلماء، إلا أنه غريب للشخص الذي لا يدرك حتى اللغة المستخدمة.

كُتب هذا الكتاب باللغة الانجليزية (بين يديكم الترجمة العربية له) ورُتّب على هيئة دراسة حالة. فهو ينقل فهماً وتقديرا للفيزياء من خلال إيجاد المفاهيم والمبادئ الفيزيائية في الأشياء المألوفة في حياتنا اليومية. بما أن بنية الكتاب معرّفة من خلال أمثلة واقعية من الحياة، فإنه من الضرورة أن يناقش الكتاب المفاهيم عند الحاجة لها مع إعادة التطرق لها لاحقا عندما تظهر في أشياء أخرى. أي الطرق أفضل من ذلك لإظهار شمولية قوانين الطبيعة؟

• **إعادة كتابة الفصول التي تطرقت إلى الموائع والحركة، والكهرباء، والمغنطيسية والديناميكا الكهربائية.** كل من الطلبة والمعلمين عانوا من هذه الفصول الثلاثة في الطبعة الثانية. استجابة لنقد بنّاء كثير، قمت بإعادة كتابة هذه الفصول تقريبا من البداية. النسخ الجديدة أكثر سهولة، وتعرض أشياء أفضل، وتطوّر فيزياء تلك الأشياء بتدرّج وعناية أكبر.

• **مجاراة التقنيات الحديثة.** في حين تتغير الفيزياء عند المستوى المبتدئ ببطء شديد، إلا أن الأشياء التي تُظهر تلك الفيزياء تتغيّر بشكل يومي تقريباً. تعكس هذه الطبعة العديد من تلك التغيرات، خصوصا في الفصول الخاصة بالمشغلات الصوتية، والليزرات والدايودات الباعثة للضوء LED، والكاميرات. لقد ألغيت الفصل الخاص بالتلفاز من هذه الطبعة، لأن التلفاز في وضع تغيّر مستمر بحيث ما أكتبه عنه هنا سيكون مهملاً أو غير مرتبط بالموضوع خلال سنة أو سنتين.

• **تضمين كل من وحدات النظام العالمي SI والوحدات البريطانية.** قد يتمنّى العلماء غير ذلك، ولكن معظم الأشخاص في الولايات المتحدة الأمريكية سيستمرون بالتفكير وفق الوحدات البريطانية لفترة من الزمن. إدراكاً لتلك الحقيقة، توفّر هذه الطبعة كلاً من وحدات SI (المترية) والوحدات البريطانية كلما لزم الأمر.

• **فصل الكتاب المطبوع عن المواقع الإلكترونية.** حاولت الطبعة الثانية الجمع بين العالمين المطبوع والإلكتروني، فكرة واعدة ولكنها غير عملية. أصبحت الطبعة الثالثة مطبوعة بأكملها، مع وجود مواقع إلكترونية مساندة للكتاب بدلاً من محاولة أن تكون جزءاً منه.

تغييرات الهيئة

• **إطارات تنبيهية للمعتقدات الخاطئة الشائعة والحدس الخاطئ.** ما يسمعه الناس أو يظنون أنهم قد واجهوه ليس هو دائما طريقة عمل عالمنا في الحقيقة. هناك عدد من المعتقدات الخاطئة الشائعة والحدس الخادع التي يمكن بسهولة أن تربك الطلاب وتهز من ثقتهم فيما يتعلمونه. في هذه الطبعة، أناقش بوضوح الخلافات بين ما يتوقعه الطلاب ببساطة من العالم ورأي الفيزياء حول ذلك. لكي ينجح الطلاب في إنزال الفيزياء في حياتهم اليومية، يجب عليهم أن يبددوا التناقضات بين ما يتعلمونه وبين ما يظنون أنهم تعلموه. ستساعد الهيئة الجديدة للكتاب، والإطارات التوضيحية بداخله، الطلاب في تحقيق ذلك.

مراجع بأرقام الصفحات لملخصات الفصول وإجابات الأسئلة. يتم توجيه القارئ الراغب في مقدمة تفصيلية أكثر للفصل إلى ملخص الفصل مباشرة. وعند البحث عن إجابة أو تفسير أسئلة «تحقق من فهمك» أو «دقق في أرقامك»، سيتمكن القارئ من معرفة رقم الصفحة التي يجدها فيها.

• **تنبيه بصري أفضل للنقاط المهمة.** تظهر معظم المفاهيم الفيزيائية والقوانين المهمة، كنصوص داخل إطارات. هذه الطريقة تركّز الانتباه على المفاهيم المهمة، وتجعل من السهل مراجعة المادة.

أهداف هذا الكتاب

عند قراءة هذا الكتاب، سيتمكن الطلبة من:

١. **البدء في رؤية دور العلم في الحياة اليومية.** العلم في كل مكان؛ نحتاج فقط لأن نفتح أعيننا لرؤيته. نحن محاطون بأشياء يمكن فهمها من خلال العلم، وكثير منها في متناول الطالب، ورؤية العلم لا تعني بالضرورة أنه عند رؤية لوحة فنية زيتية يتم ملاحظة الانعكاسات المختارة للضوء الساقط من على الجزيئات العضوية وغير العضوية فقط، بل يجب إدراك أن هناك جمالاً للعلم يُكمل الجمال الفنّي، ويمكن للطلبة أن يتعلموا أن ينظروا لغروب الشمس الأحمر المتألق ويقدروا كلاً من مظهره وكيفية حدوثه.

٢. **التعلّم بأن العلم ليس مخيفا.** إن زيادة تعقيد التقنية في عالمنا زرع في معظم الناس خوفاً كبيراً من العلم. بينما تزداد الشقة بين الذين يصنعون التقنية وبين الذين يستخدمونها، فإن المقدرة على فهم بعضهم البعض والتواصل بينهما تقل. لم يعد الإنسان الاعتيادي يحاول تصليح أي جهاز عاطل، والعديد من الأجهزة الحديثة مصنوعة للطرح بعد الاستخدام، فهي معقدّة جدا لا يمكن تطويرها أو إصلاحها. لمواجهة القلق المرافق للجهل، يوضح هذا الكتاب للطلاب أن معظم الأشياء يمكن فحصها وفهمها، وأن العلم الذي تستند عليه ليس مخيفا على الإطلاق، فكلما زاد فهمنا لطريقة تفكير الآخرين، كنا في حال أفضل.

٣. **تعلّم التفكير بشكل منطقي لحل المشكلات.** بما أن الكون يخضع لنظام من القوانين المحددة بدقة، فهو يسمح بفهم منطقي لسلوكه، مثل علوم الرياضيات والحاسب الآلي، فإن علم الفيزياء هو مجال دراسة يسود المنطق فيه وله مكانة عالية. بتعلّم عدد قليل من القوانين، يمكن للطلبة أن يدمجوها منطقيا للحصول على قوانين أكثر تعقيدا ويكونوا على ثقة أن هذه القوانين الجديدة صحيحة. لذا، فإن دراسة الأنظمة الفيزيائية هي مكان جيّد للتدريب على التفكير المنطقي.

٤. **تطوير وتوسيع الحدس الفيزيائي.** عند خروجك من مخرج على طريق سريع، لن تحتاج أن تأخذ في الاعتبار السرعة والتسارع والقصور الذاتي لكي تعلم أنك تحتاج أن تقلل السرعة تدريجيا- لديك حدس فيزيائي مسبق يخبرك بنتائج القيام بغير ذلك. مثل هذا الحدس الفيزيائي مهم في الحياة اليومية، لكنه في العادة يأخذ بعضا من الوقت والخبرة لاكتسابه. يهدف هذا الكتاب لتوسيع حدس الطلبة الفيزيائي في حالات يتجنبونها في العادة أو لم يخضعوا لها من قبل. على كل، هذا هو أحد أهداف القراءة والتعلّم: أن تتعلم من تجارب الآخرين.

٥. **تعلّم كيفية عمل الأشياء.** حينما يفسر هذا الكتاب الأشياء في حياتنا اليومية، يكشف الغطاء تدريجيا عن معظم القوانين الفيزيائية التي تحكم الكون، ويكشف الكتاب عن هذه القوانين كما تم اكتشافها في الأصل: أثناء محاولة فهم أشياء حقيقية. بينما يقرأ الطلاب هذا الكتاب ويتعلمون هذه القوانين، سيبدأون برؤية التشابهات بين الأشياء، والآليات المشتركة، والأفكار المتكررة التي تُعاد استخدامها من قِبل الطبيعة أو الأشخاص. يذكّر هذا الكتاب الطلبة بهذه العلاقات وهو مُرتّب بحيث أن فهم الأشياء اللاحقة مبنّي على استيعاب المفاهيم التي تعرضوا لها مسبقا.

٦. **بدء الفهم بأن الكون قابل لأنْ يُتنبأ به بدلا من أنه سحري.** أحد أسس العلم هو أن الحوادث لها مسببات ولا تحدث اعتباطا. مهما يحدث، يمكننا النظر للخلف في الزمن لمعرفة مسببه. يمكننا أيضا أن نتنبأ بالمستقبل لحدّ ما، استنادا على بصيرة مكتسبة من الماضي وعلى علم بالحاضر. وعند محدودية التنبؤ، يمكننا فهم هذه الحدود. الذي يميّز العلوم الطبيعية والرياضيات عن المجالات العلمية الأخرى هو أن هناك في الغالب إجابات مطلقة خالية من عدم الثبات أو التناقض. بمجرد أن يفهم الطلبة كيف تحكم القوانين الفيزيائية الكون، يمكنهم أن يبدؤوا في تقدير أن المظهر الأكثر سحرا لكوننا هو أنه ليس سحريا؛ أي أنه منتظم، ومرتّب، وقابل للفهم.

٧. **الحصول على نظرة عن تاريخ العلوم والتقنية.** لم تظهر أي من الأشياء التي يتطرق لها هذا الكتاب فجأة أو بشكل تلقائي ونتيجة عمل فرد يعمل بمعزل عن ما تم القيام به مسبقا، فلقد تم تطوير هذه الأشياء من خلال سياق تاريخي لأشخاص مدركين لما يقومون به، وغالبا كانوا مطلعين على أشياء مشابهة موجودة. إن كل شيء تقريباً يتم اكتشافه أو تطويره عندما تقوم أنشطة ذات علاقة بجعل اكتشافه أو تطويره أمرا محتما وفي وقته، لتأسيس ذلك السياق التاريخي، ويصف هذا الكتاب بعض التاريخ الواقع خلف الأشياء التي يناقشها.

مواقع إلكترونية للطلبة

يدعم هذا الكتاب مجموعة من الملاحق الإلكترونية للطلبة. بدءاً بالموقع الإلكتروني لهذا الكتاب (باللغة الانجليزية)، وللطالب موارد مجانية يمكن الوصول إليها بسهولة تتضمّن:

- **فصولاً وأقساماً وفروعاً إضافية.**
- **تمارين ومسائل وحالات إضافية.**
- **أسئلة مراجعة وملخصات للمفاهيم الفيزيائية.**

موقع إلكتروني ودليل للمعلمين

يمكن الوصول للموقع الإلكتروني الخاص بالمعلمين من نفس الموقع الإلكتروني للكتاب، وهو يوفّر كل ما ذُكر أعلاه بالإضافة إلى الوصول إلى:

- **أسئلة واجبات منزلية إضافية وحلولها.**
- **أسئلة امتحانات وحلولها.**
- **أفكار تنظيمية لتصميم مقرر دراسي.**
- **أفكار لتجارب توضيحية لكل فصل.**
- **شرائح للمحاضرات تغطي كل فصل.**
- **رسومات يمكن استخدامها في العروض.**
- **قائمات بالمصادر.**

وايلي بلوس (Wiley PLUS)

الطبعة الثالثة من «كيف تعمل الأشياء» متوفرة باللغة الانجليزية في Wiley PLUS. Wiley PLUS وهو أداة على الانترنت تسمح بإدارة المقرر بسهولة. تم وضع نظام يحتوي على مسائل مختارة من مسائل نهاية الفصول وكذلك «مستودع الاختبارات» الكامل، والتي يمكن إعطاؤها كواجبات منزلية من خلال الانترنت. كما يقدم Wiley PLUS نسخة إلكترونية من هذا الكتاب والتي يمكن اقتناؤها بسعر مخفّض.

المحتويات

الفصل الرابع: الأجسام الميكانيكية - الجزء الثاني ١٠٧

الفصل الخامس: المـــوائـــع ١٣٥

الفصل السادس: الموائع والحركة ١٦١

الفصل السابع: الحرارة وتحولات الطور ١٩٧

الفصل الثامن: الديناميكا الحرارية ٢٣١

الفصل ١

قوانين الحركة الجزء الأول

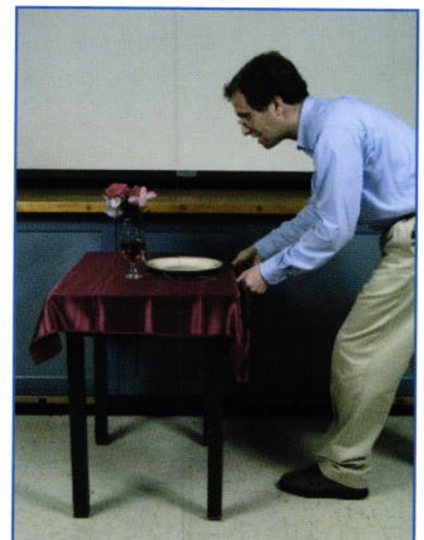
إنّ الهدف من هذا الكتاب هو توسيع منظورك للأشياء والمواقف المألوفة لك من خلال مساعدتك على فهم العمليات الطبيعية (الفيزيائية) التي تجعلها تعمل. على الرغم من أن العلم هو جزء من وجودنا اليومي - وليس نشاطاً خاصاً نقوم به أحياناً، إن قمنا به أساساً - فإن معظمنا يهمله أو يعتبره مسلّما به. في هذا الكتاب سنواجه تلك النزعة من خلال تلمس العلم الموجود في العالم من حولنا، وفي الأشياء التي نصادفها كل يوم. سوف نرى أن الأشياء والأحداث التي قد تبدو «سحرية»، هي في الحقيقة بسيطة وواضحة جدا عندما نعرف بعض المفاهيم الفيزيائية التي تجعلها ممكنة. باختصار، سوف نتعلم الفيزياء - دراسة العالم المادي والقوانين التي تحكم سلوكه.

لمساعدتنا في البدء، فإن الفصلين الأولين سيؤديان غرضين: التعريف بلغة الفيزياء، والتي سنستخدمها في هذا الكتاب، وتقديم القوانين الأساسية للحركة والتي سيستند عليها كل شيء. في الفصول التالية، سنستكشف أشياء مثيرة ومهمة، وتكمن هذه الأهمية في ذاتها وفي القضايا العلمية التي تثيرها. معظم هذه الأشياء، كما سنرى، تتضمن العديد من المظاهر الفيزيائية وبالتالي تجلب التنوع لكل فصل وقسم. ولكن الفصلين الأولين خاصان لأنه يجب عليهما توفير مقدمة منهجية منظمة لعلم الفيزياء نفسه.

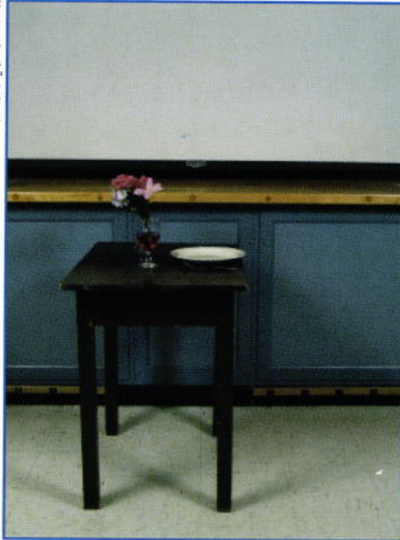
تجربة: إزالة مفرش مائدة

أحد التأثيرات «السحرية» المشهورة هو العمل البطولي لإزالة مفرش مائدة من مائدة معدّة دون كسر الأواني التي عليها. يسحب الشخص الذي ينجز هذا العمل المثير يسحب المفرش من تحت أواني المائدة في حركة واحدة خاطفة وسريعة. بقليل من التوفيق- مع عدم إغفال كون المفرش أملساً وزلقاً - ينزلق المفرش من فوق الطاولة فجأة ، تاركاً الأواني التي عليها كما هي دون أن تتأثر فعليا.

بتدريب بسيط، يمكنك أنت أيضا أن تقوم بهذه التجربة المثيرة. اختر مفرش مائدة أملساً وغير مكفوف، وخالياً من العيوب التي قد تجعله يعلق بالأواني. إن استخدام قماش ناعم ومرن مثل الحرير سيساعد كثيرا، لأنه سيمكنك من سحب







بإذن من لوي بلومفيلد

القماش للأسفل من حافة الطاولة. عندما تتحصل على الشجاعة اللازمة للقيام بهذه التجربة المثيرة - بالطبع باستخدام أوان غير قابلة للكسر- احرص أن تقوم بعملية السحب بشكل فجائي على قدر الإمكان، مع جعل الوقت الذي تقضيه لسحب القماش من تحت الأواني أقل ما يمكن. سيساعد في هذه العملية أن تمسك بالقماش بحيث تكون راحة كفيك إلى الأسفل مع جعل القماش يتدلى بحرية بين كل من اليدين والطاولة لكي تتمكن من تحريك يديك قبل نزع المفرش بشدة وانزلاقه من على الطاولة. تجنب خطأ البدء ببطء وإلا ستقوم بالتقاط الأواني المبعثرة.

قبل أن تقوم بهذا العمل المثير، حاول أن تتنبأ بما سيحدث عندما تقوم بسحب المفرش. ما هي المسافة التي ستتحركها الأواني - أم أنها لن تتحرك إطلاقا؟ ما أهمية السرعة التي ستسحب بها المفرش؟ كيف يؤثر وزن كل إناء على حركته أو عدم حركته؟ هل قوام سطح الإناء مهم؟ كيف سيؤثر فرك الإناء بورق شمعي على النتائج؟

والآن، قم بسحب مفرش المائدة ولاحظ ماذا يحدث. ببعض من التفاؤل، ستظل الأواني على الطاولة مرتبة كما هي. إذا لم يحدث ذلك، حاول مرة أخرى، ولكن هذه المرة غيّر من سرعة مفرش المائدة أو نوع الآنية أو الطريقة التي تسحب بها المفرش. انظر إذا كان بإمكانك قياس تأثير هذه المتغيرات على الأواني. هل كان أداء كل شيء كما توقعت؟ هل النتائج تُحقق تنبؤاتك، أم كانت تلك التنبؤات خاطئة؟

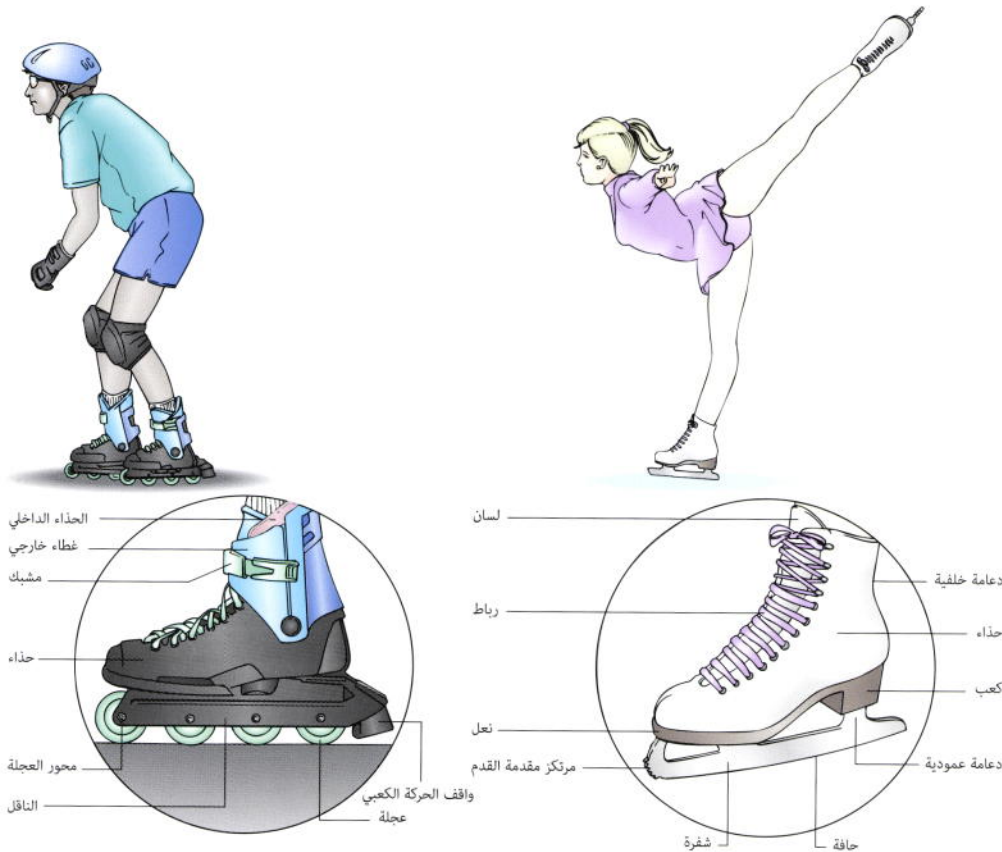
إذا لم يكن لديك مفرش مائدة مناسب، أو أوان يمكنك أن تخاطر باستخدامها، فإن هناك العديد من التجارب المماثلة التي يمكنك أن تجربها. ضع عدداً من العملات النقدية المعدنية على قطعة من الورق ثم قم بسحب الورقة بخفة وسرعة من تحت العملات. أو قم برصّ عدد من الكتب بعضها فوق بعض على طاولة ثم استخدم مسطرة صلبة لإزاحة الكتاب السفلي من تحت باقي الكتب. والأكثر إعجاباً موازنة قلم رصاص قصير ليس له ممحاة موضوع على قمة حلقة خشبية، والتي هي في حالة توازن على فتحة قنينة زجاجية. إذا قمت بنزع الحلقة الخشبية بسرعة كافية، فإن قلم الرصاص سيظل في وضعه الأول وسيسقط تلقائيا داخل القنينة.

سنعود لتجربة مفرش المائدة مرة أخرى في نهاية هذا الفصل. في هذه الأثناء، سنستكشف بعض المفاهيم الفيزيائية التي ستساعد في توضيح سبب نجاح تجربتك - أو، إذا لم تنجح، لماذا الأرض مغطاة بالأواني الآن.

دليل الفصل

لدراسة هذه المفاهيم، سوف ننظر بعناية لثلاثة أنواع من الأنشطة والأجسام التي نراها في حياتنا اليومية: (١) التزلج، و(٢) كرات ساقطة، و(٣) المنحدرات. في قسم التزلج، سوف نرى كيف تتحرك الأجسام دون أن يدفعها شيء. وفي قسم الكرات الساقطة، سنرى كيف يمكن أن تتأثر تلك الحركة بالجاذبية الأرضية. وفي قسم المنحدرات، سنكتشف الفائدة الميكانيكية وكيف أن الانحدار التدريجي يجعل من الممكن رفع الأجسام الثقيلة دون الحاجة لدفعها بقوة. وللحصول على صورة أكمل لما سنتطرق له في هذا الفصل اقلب الصفحات حتى تصل إلى ملخص الفصل في صفحة ٣١.

هذه النشاطات قد تبدو رتيبة، ولكن فهمها بدلالة القوانين الفيزيائية يتطلب تفكيراً كثيراً. هذان الفصلان التمهيديان سيكونان مثل تسلق حافة هضبة مرتفعة: الصعود لن يكون سهلاً وهدفنا سيكون مخفياً عن أنظارنا، ولكن بمجرد أن نصل إلى القمة، مع وجود المفردات والمفاهيم الأساسية الفيزيائية في مكانها الصحيح، سنكون قادرين على تفسير تشكيلة واسعة من الأشياء بجهد إضافي بسيط فقط. والآن سنبدأ بالاعتلاء.



١-١ التزلج

مثل العديد من الألعاب الرياضية، فإن التزلج أصعب مما يبدو. كمتزلج مبتدئ، من المحتمل أن تجد نفسك تسقط وتنهض مرارا وتكرارا من الأرض أو الجليد، وسيأخذ الأمر بعضاً من التدريب قبل أن تتمكن من التزلج إلى الأمام بسلاسة أو التوقف برشاقة. ولكن سواء كنت مرتدياً زلاجات الجليد أو زلاجات ذات عجلات، فإن فيزياء حركتك بسيطة بشكل مذهل. عندما تكون على سطح مستوٍ وزلاجاتك تشير للأمام، فإنك تتزحلق!

التزحلق هو أحد المفاهيم الأساسية في الفيزياء، وهو نقطة بدايتنا في هذا الكتاب. وسينضم له في هذا الفصل مفاهيم بدء الحركة والتوقف والانعطاف، والتي مجتمعة ستمكننا من فهم القوانين الأولية للحركة. سوف نترك الأسطح المنحدرة للقسم الذي سنتحدث فيه عن المنحدرات ولن يكون لدينا متسع من الوقت لنعلـّمك كيف تقوم بالدوران أو تكسب سباقاً. على الرغم من ذلك، استكشافنا للتزلج سيضعنا على بداية الطريق لفهم المبادئ الأساسية التي تحكم جميع الحركات.

أسئلة للتفكير

ماذا نعني بـ «الحركة»؟ ما الذي يجعل المتزلجين يتحركون، وعندما يبدؤون بالحركة، ما الذي يجعلهم يستمرون في الحركة؟ ماذا نـحتاج لكي نوقف متزلجا أو نـحوّل ذلك المتزلج نـحو اتجاه آخر؟

تجارب يمكن القيام بها

قضاؤك ساعة أو ساعتين على الجليد أو في حلبة التزلج سيكون مثاليا، ولكن إذا لم يكن لديك زلاجات فاستخدم لوحة تزلج أو مقعداً ذا عجلات. حرك نفسك للأمام على سطح مستوٍ ثم اترك نفسك تتزحلق. ما الذي يدفعك إلى الأمام؟ هل هناك شيء يدفعك للأمام؟ هل ينعكس اتجاهك وأنت تتزحلق؟ كيف يمكنك وصف موقعك في لحظة معينة؟ كيف

يمكنك قياس سرعتك؟

قبل أن تصطدم بجدار أو شجرة، بطئ نفسك إلى أن تتوقف. ما الذي جعلك تتباطأ؟ هل ما زلتَ تتزحلق عندما كنت تحاول التوقف؟ هل دفعك شيء وأنت تبطئ نفسك؟

حرك نفسك مرة أخرى. ما الذي جعلك تتسارع؟ بأي سرعة يمكنك أن تزيد من سرعتك وما الذي تفعله بطريقة مختلفة لكي تسرع بشكل أسرع؟ والآن دُر لجانب أو آخر. هل دفعك شيء وأنت تحاول الدوران؟ ماذا حدث لسرعتك؟ ماذا حدث لاتجاه سيرك؟

الانزلاق للأمام: القصور الذاتي والتزحلق

بينما تقوم بارتداء زلاجاتك، لنأخذ لحظة للتفكير بشأن ما يحدث لشخص لا يوجد أي شيء يدفعه على الإطلاق. عندما يكون حراً من أي تأثيرات خارجية (شكل ١-١-١)، أي غير خاضع لدفع أو شد، هل يقف بلا حراك؟ هل يتحرك؟ هل تزيد سرعته؟ هل تبطأ سرعته؟ باختصار، ما الذي يعمله؟

الجواب الصحيح، لما يبدو أنه سؤال بسيط، قد راوغ البشر لآلاف السنين؛ حتى أرسطو، والذي قد يعد الفيلسوف الأكثر علما حول العالم الكلاسيكي (التقليدي)، أخطأ فيه (انظر ^١) الذي يجعل هذا السؤال مخادعاً هو حقيقة أن الأجسام على الأرض ليست حرة من أي تأثير خارجي؛ بل هي كلها تدفع وتحتك أو تتفاعل مع بعضها البعض بطريقة ما أو بأخرى.

نتيجة لذلك، فقد أخذ الفلكي والرياضي والفيزيائي الإيطالي المبدع غاليليو غاليلياي العديد من السنوات في الملاحظة الدقيقة والتحليل المنطقي للإجابة على هذا السؤال (انظر ^٢) . الحل الذي توصل إليه، مثل السؤال نفسه، يبدو بسيطاً: إذا كان الشخص ساكناً، فسيظل ساكناً؛ وإذا كان يتحرك في اتجاه معين، فسيستمر في التحرك في هذا الاتجاه بسرعة ثابتة، متبعاً مساراً مستقيما. هذه الخاصية للحركة الثابتة في حالة غياب أي مؤثر خارجي تسمى القصور الذاتي.

> **القصور الذاتي**
>
> **الجسم المتحرك يميل للبقاء على حركته؛ والجسم الساكن يميل للبقاء على سكونه.**

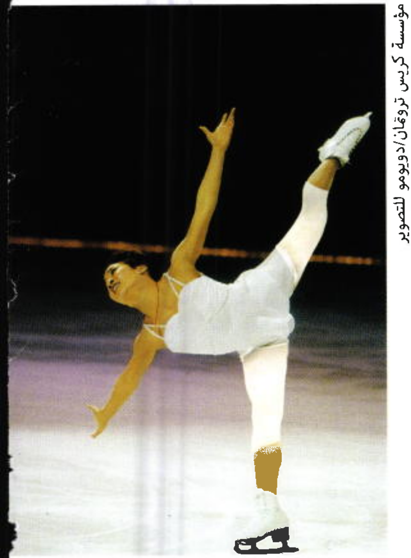
السبب الرئيس خلف إخفاق أرسطو في اكتشاف القصور الذاتي، ولماذا نحن أيضا في الغالب نغفل القصور الذاتي، هو الاحتكاك. فعندما تتزحلق على الأرض مرتدياً أحذيتك فإن الاحتكاك سريعاً ما يبطئ من سرعتك إلى أن تتوقف ويخفي قصورك الذاتي. لجعل القصور الذاتي أكثر وضوحا، يجب علينا التخلص من الاحتكاك. لذلك أنت تلبس الزلاجات.

تكاد الزلاجات تزيل الاحتكاك كليا، على الأقل في اتجاه واحد، لكي تتمكن من التزحلق بسهولة وبدون جهد على الجليد أو في حلبة التزلج وتتلمس القصور الذاتي الخاص بك. لتبسيط الأمر، لنتخيل أن زلاجاتك مثالية وأنك لا تواجه أي احتكاك وأنت تتزحلق. أيضا، في هذا الفصل والفصلين القادمين، سوف نتجاهل ليس فقط الاحتكاك بل مقاومة الهواء أيضا. طالما أن الهواء هادئ وأنت لا تتحرك بسرعة عالية، فإن مقاومة الهواء ليست بالأهمية الكبيرة للتزحلق على أية حال.

والآن وأنت مستعد للتزحلق، سنبدأ بفحص خمس كميات فيزيائية مهمة تتعلق بالحركة، والنظر في علاقة هذه الكميات ببعضها البعض. هذه الكميات هي: الموقع، والسرعة، والكتلة، والتسارع، والقوة.

لنبدأ بوصف المكان الذي أنت فيه. في أي لحظة معينة، أنت موجود في **موقع**، أي في نقطة محددة في الفضاء. حينما نبلّغ عن موقعك، فهو دائما يُعطى **كمسافة واتجاه** من نقطة مرجعية: كم متراً شمال مكان المرطبات أو كم كيلومتراً غرب مدينة كليفلاند (مدينة في الولايات المتحدة الأمريكية).

متجه الموقع هو مثال لكمية فيزيائية متجهة. **الكمية المتجهة** تتكون من كلٍّ من مقدار واتجاه؛ **فالمقدار** يخبرك بمقدار الكمية الموجودة بينما الاتجاه يخبرك في أي اتجاه تشير هذه الكمية. إن الكميات المتجهة شائعة في الطبيعة. عندما تصادف واحدة منها، انتبه لجزء الاتجاه؛ إذا كنت تبحث عن كنز مدفون على بعد


مؤسسة كريس تروغمان/دوبيمو للتصوير

(شكل ١-١-١) تنزلق المتزلجة ميشيل كوان دون أي تأثيرات أفقية. إذا كانت المتزلجة ساكنة فإنها ستظل ساكنة؛ وإن كانت متحركة فإنها ستظل متحركة.

^١ وضع أرسطو (فيلسوف يوناني ٣٢٢-٣٨٤ قبل الميلاد) نظرية مفادها أن سرعة الأجسام تتناسب مع مقدار القوة المؤثرة عليها. بينما توقُّع هذه النظرية صحيح فيما يخص سلوك الأجسام المنحدرة، لكنه خاطئ فيما يخص أن الأجسام الثقيلة تسقط أسرع من الأجسام الخفيفة. على الرغم من هذا، فلقد ظلت نظرية أرسطو سائدة وقتاً طويلاً، ويعول ذلك بشكل جزئي لصعوبة التوصل إلى النظرية المبسطة والأكمل، والجزء الآخر لأن منهجية البحث العلمي التي تربط النظرية بالمشاهدة أخذت بعضاً من الوقت لتتطور.

^٢ بينما كان أستاذاً في بيزا، كان غاليليو غاليلياي (عالم إيطالي، ١٥٦٤-١٦٤٢م) ملزما بتعليم الفلسفة الطبيعية لأرسطو. نتيجة لتوتره حول التناقض الموجود بين نظرية أرسطو والمشاهدات الموجودة في العالم حوله، قام غاليليو بتصميم تجارب قاست السرعة التي تسقط بها الأجسام واستطاع أن يتوصل إلى أن كل الأجسام الساقطة تسقط بنفس المعدل.

ثلاثين خطوة من الشجرة العتيقة ولكنك نسيت أنها باتجاه الشرق من تلك الشجرة، فسيكون أمامك الكثير من الحَفْر.

أنت الآن على قدميك وتبدأ بالتزلج. إذا كنت تتحرك، فإن موقعك يتغير. بعبارة أخرى، أصبح لك سرعة. **السرعة** تقيس سرعة تغير موقعك؛ وهي كميتنا المتجهة الثانية وتشمل مقدار السرعة الذي تتحرك بها والاتجاه الذي تسير نـحوه. **مقدار السرعة** هو المسافة التي تقطعها في فترة زمنية معينة.

$$\text{السرعة} = \frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$$

والاتجاه الذي تسير نـحوه قد يكون شرقا، أو شمالا، أو إلى الأسفل - إذا كنت تسقط.

لكن عندما تتزلج بحرية، بدون وجود أي شيء يدفعك أفقيا، فإن سرعتك يمكن وصفها بسهولة. بما أنك تسير بسرعة مستقرة في مسار خط مستقيم، فإن سرعتك لا تتغير – هي ثابتة. على سبيل المثال، إذا كنت متجها للغرب بسرعة مقدارها 10 أمتار لكل ثانية (33 قدم لكل ثانية)، فستكون لك هذه السرعة لفترة غير محددة. فسرعة 10 أمتار لكل ثانية تعني أنه إذا سرت لمدة ثانية واحدة بسرعتك الحالية، فإنك سوف تقطع مسافة 10 أمتار. وبما أن سرعتك ثابتة، فإنك سوف تقطع مسافة 100 متر في 10 ثوانٍ، و 1000 متر في 100 ثانية، وهكذا. علاوة على ذلك، فإن مسارك الذي ستأخذه هو خط مستقيم. باختصار، سوف تتزحلق.

بفضل زلاجاتك، يمكننا الآن إعادة صياغة الوصف السابق للقصور الذاتي بدلالة السرعة: الجسم المتحرك غير الخاضع لأي مؤثر خارجي يتحرك بسرعة ثابتة، أي يقطع مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية على طول مسار خط مستقيم. هذه العبارة كثيراً ما تعرف بقانون نيوتن الأول، نسبة لمكتشفه، الرياضي والفيزيائي الإنجليزي السيد إسحاق نيوتن (انظر ٥[٣]) . المؤثرات الخارجية المُشار لها في هذا القانون تسمى قوى، وهي تعبير تقني للدفع والشد.

قانون نيوتن الأول للحركة

الجسم المتحرك غير الخاضع لأي قوة خارجية يتحرك بسرعة ثابتة، ويقطع مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية على طول مسار خط مستقيم.

تنشيط الحدس: التزلج

الحدس يقول أنه عندما لا يوجد شيء يدفع جسما متحركا، فإن هذا الجسم يتباطأ إلى أن يتوقف؛ فيجب أن تدفعه لتجعله يستمر في حركته.

الفيزياء تقول أنه عندما لا يوجد شيء يدفع جسما متحركا، فإن هذا الجسم يسير بسرعة ثابتة.

القرار: تتعرض الأجسام في العادة لقوى خفية، مثل الاحتكاك أو مقاومة الهواء، والتي تميل لتبطئة الجسم المتحرك. إزالة تلك القوى الخفية أمر صعب، لذا نادراً ما نرى ظاهرة تزحلق الأجسام المتحركة في حالة عدم وجود قوى.

تحقق من فهمك #١ : قرص (لعبة الهوكي) على الجليد (للإجابة ، انظر صفحة ٣٢)

لماذا يواصل قرص لعبة الهوكي الانزلاق عبر حلبة التزلج على الرغم من عدم وجود شخص يدفعه؟

٥[٣] في عام ١٦٦٤م، بينما كان السّيد إسحاق نيوتن (عالم ورياضي إنجليزي، ١٦٤٢-١٧٢٧م) طالباً في جامعة كامبردج، أُجبرت الجامعة لإغلاق أبوابها لمدة ١٨ شهراً بسبب انتشار الطاعون. انتقل نيوتن إلى الريف واكتشف قوانين الحركة والجاذبية واخترع القواعد الرياضية لحساب التفاضل والتكامل. هذه الاكتشافات، إضافة إلى ملاحظته أن الأجرام السماوية مثل القمر تخضع لنفس القوانين الطبيعية البسيطة التي تخضع لها الأجسام الأرضية، مثل التفاحة (فكرة جديدة في ذلك الوقت)، تم تدوينها في كتابه فلسفة الطبيعة والمبادئ الرياضية (Philosophie Naturalis Principia Mathematica) والذي نشر لأول مرة في عام ١٦٨٧م. هذا الكتاب ربما يعد العمل العلمي والرياضي الأكثر أهمية وتأثيرا على مدار الزمن.

بديل التزحلق: **التسارع**

بينما تتزحلق إلى الأمام وبدون وجود أي شيء يدفعك أفقيا، ما الذي يمنع سرعتك واتجاهك من التغير؟ الجواب هو كتلتك. الكتلة هي مقياس قصورك الذاتي، أي مقاومتك لتغيير سرعتك. تقريبا كل شيء في الكون له كتلة. ولأن لديك كتلة، فإن سرعتك ستتغير فقط إذا دفعك شيء – أي، فقط إذا تعرضت لقوة. سوف تستمر بثبات في الحركة في خط مستقيم إلى أن يدفعك شيء بقوة توقفك أو تحيدك لاتجاه آخر. القوة هي كميتنا المتجهة الثالثة، فلها مقدار واتجاه. في نهاية الأمر، الدفع لليمين يختلف عن الدفع لليسار.

عندما يدفعك شيء ما، فإن سرعتك تتغير؛ بعبارة أخرى، أنت تتسارع. التسارع هو كميتنا المتجهة الرابعة، ويقيس السرعة التي تتغير بها سرعتك. أي تغيير في سرعتك هو تسارع، سواء كنت تسرع، أو تبطئ، أو حتى تنعطف. إذا تغير مقدار سرعتك أو اتجاه سيرك، فأنت تتسارع!

مثل أي كمية متجهة، التسارع له مقدار واتجاه. لرؤية كيف يعمل هذان الجزءان من التسارع، تخيل أنك عند خط البدء لسباق، منتظرا بدايته. يدق جرس البدء وأنت تنطلق! تدك زلاجاتك في الأرض تحتكَ وتبدأ بالتسارع - تزيد سرعتك وتقطع مسافات بسرعة أكبر وأكبر. مقدار تسارعك يعتمد على مقدار قوة دفع الأرض لك للأمام. إذا كان السباق طويلا ولست مستعجلاً، فإنك تحصل على دفع متواضع من السطح ويكون تسارعك قليلاً، وتتغير سرعتك ببطء. ولكن إذا كان السباق قصيرا وليس لديك لحظة لإضاعتها، فإنك تثب للأمام بقوة ويقوم السطح ببذل قوة دفع أمامية عظيمة عليك. إن كمية تسارعك كبيرة وتتغير سرعتك بسرعة. في هذه الحالة، يمكنك فعلا أن تشعر بقصورك الذاتي معارضا جهدك لزيادة سرعتك.

ولكن التسارع له أكثر من مجرد مقدار. عندما تبدأ بالسباق، فإنك أيضا تختار اتجاهاً لتسارعك – الاتجاه الذي تتغير سرعتك بالنسبة للزمن نـحوه. هذا التسارع هو في نفس اتجاه القوة التي أحدثته. إذا تحصلت على قوة أمامية من السطح، فإنك ستتسارع للأمام – سرعتك ستتغير أكثر وأكثر للأمام. إذا تحصلت على قوة جانبية من الأرض، فإذاً .... المتسابقون الآخرون سيتحتم عليهم القفز بعيدا عن مسارك بينما تترنح نـحو الحائط، وسيضحكون عليك طوال الطريق لخط النهاية لفشلك في إدراك أهمية الاتجاه في تعريف كل من القوة والتسارع.

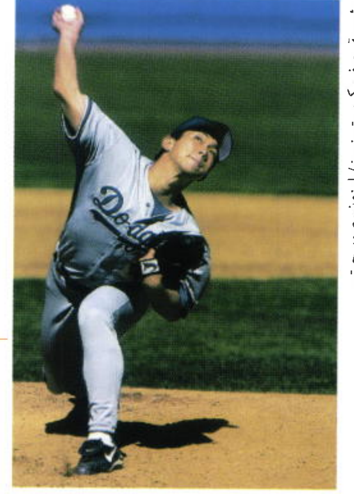
ما إن تسير بسرعة كافية، يمكنك بعدها التوقف عن مقاومة القصور الذاتي والبدء بالتزحلق. ستسير للأمام بسرعة ثابتة. الآن القصور الذاتي يساعدك؛ فهو يبقيك تتحرك بثبات على الرغم من عدم وجود شيء يدفعك للأمام. (تذكر أننا نهمل الاحتكاك ومقاومة الهواء. في الواقع، هذه المؤثرات تدفعك للخلف وبشكل تدريجي ستبطئك بينما أنت تتزحلق. مع ذلك، وبما أننا نهملها في هذا الفصل، حركتك ستكون سلسة وثابتة.)

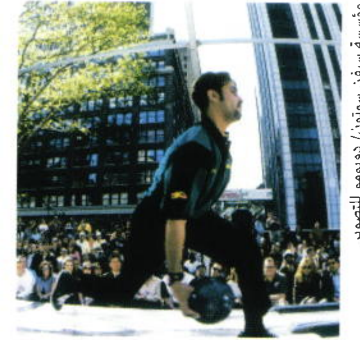
ولكن حتى وإن كنت لا تحاول الإسراع أو التباطؤ، مازال يمكنك التسارع. فبينما توجّه زلاجاتك أو تصعد فوق عائق، فإنك تواجه قوى إما جانبية أو للأعلى أو للأسفل، والتي تغير من اتجاه سيرك وبالتالي، تجعلك تتسارع.

أخيرا ينتهي السباق وأنت تتزحلق لتتوقف. أنت تتسارع مرة أخرى، ولكن هذه المرة أنت تتسارع للخلف، في اتجاه معاكس لسرعتك الأمامية. بينما ندعو في الغالب هذه العملية بالتباطؤ، فإنها ليست إلا نوع خاص من التسارع. سرعتك الأمامية ستضعف تدريجيا إلى أن تصل لحالة السكون.

لمساعدتك في التعرف على التسارع، هذه بعض الأمثلة لأجسام متسارعة:

١. العدّاء الذي يثب للأمام عند بدء السباق – سرعة العداء تتغير من الصفر إلى الأمام، لذا فإن العداء يتسارع للأمام.
٢. الدراجة التي تتوقف عند مفترق الطرق – سرعتها تتغير من الأمام إلى الصفر، لذا فإنها تتسارع للخلف (هي تتباطأ).
٣. مصعد بدأ بالصعود للأعلى من الطابق الأول إلى الطابق الخامس – سرعته تتغير من الصفر إلى الأعلى، لذا فهو يتسارع للأعلى.
٤. مصعد يتوقف عند الطابق الخامس بعد قدومه من الطابق الأول – سرعته تتغير من الأعلى إلى الصفر، لذا فإنه يتسارع نحو للأسفل.
٥. سيارة تبدأ بالتحويل إلى اليسار لتتجاوز سيارة أخرى - سرعتها تتغير من الأمام إلى يسار-أمام، لذا فإن تسارعها في الغالب يسار.
٦. طائرة في لحظة بدء الهبوط – سرعتها تتغير من الأمام المستوي إلى الأمام المنحدر، لذا فإنها تتسارع إلى الأسفل.
٧. أطفال يركبون (كاروسيل) دوامة الخيل في الملاهي - بينما سرعتهم ثابتة، فإن اتجاهات حركتهم تتغير باستمرار، وسوف نناقش الاتجاه الذي يتسارعون نـحوه في القسم 3-3.


مؤسسة جيف كريستنسن/ ليزون، صور جيتي


مؤسسة سيفن سوتون/ دويومو للتصوير

(شكل ١-١-٢) تتسارع كرة البيسبول بسهولة لأن كتلتها صغيرة، بينما كرة البولينج لها كتلة كبيرة تجعل تسارعها أصعب.

هذه بعض الأجسام غير المتسارعة:

١. سيارة ساكنة - سرعتها دائما صفر.

٢. سيارة تسير إلى الأمام في مسار مستقيم على طريق ممهد ومستوٍ بسرعة ثابتة - لا يوجد تغير في سرعتها ولا اتجاه سيرها.

٣. دراجة تصعد تلة عبر طريق ممهد بسرعة ثابتة - لا تغير في سرعتها ولا اتجاه حركتها.

٤. مصعد يتحرك للأعلى بسرعة ثابتة، في منتصف المسافة بين الدور الأول والخامس - لا تتغير سرعته ولا اتجاه حركته.

رؤية التسارع ليست بسهولة رؤية السرعة. يجب أن تراقب المتزلجين عن قرب لبعض من الوقت لترى إن كانوا يتسارعون أم لا. إذا لم يكن مسارهم خطاً مستقيماً أو إذا لم تكن سرعتهم ثابتة، فإنهم في حالة تسارع.

تحقق من فهمك #٢: تغيير القطارات (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

تقضي القطارات معظم الوقت بالسير بسرعة ثابتة. متى يتسارع القطار للأمام؟ للخلف؟ لليسار؟ للأسفل؟

كيف تؤثر القوى على المتزلجين

الآن وقد تعلمنا ما هو التسارع، دعنا نرى كيف تتسارع استجابة لقوة معينة. أولاً، يعتمد تسارعك على شدة تلك القوة: كلما زادت شدة القوة زاد تسارعك. ولكن تسارعك يعتمد أيضا على كتلتك: كلما كانت كتلتك كبيرة، قلّ تسارعك. على سبيل المثال، إنه أسهل عليك تغيير سرعتك قبل تناولك لوجبة طعام غنية من بعد تناولها.

هناك علاقة بسيطة بين القوة المؤثرة عليك، وكتلتك، وتسارعك. تسارعك يساوي القوة المؤثرة عليك مقسومة على كتلتك أو، كمعادلة رياضية،

$$\text{التسارع} = \frac{\text{القوة}}{\text{الكتلة}} \qquad (١,١,١)$$

كما رأينا سابقا، فإن تسارعك يكون في نفس اتجاه القوة المؤثرة عليك.

هذه العلاقة استنتجت من قبل نيوتن من خلال ملاحظاته لحركة الأجسام، وتدعى **بقانون نيوتن الثاني** للحركة. تنظيم العلاقة بهذا الشكل يُميّز منطقيا بين الأسباب (القوة والكتلة) وآثارها (التسارع). ولكن أصبح من المألوف إعادة ترتيب المعادلة لإزالة القسمة، وبالتالي تأخذ العلاقة شكلها التقليدي، والذي يمكن أن تكتب كمعادلة لفظية:

$$\text{القوة} = \text{الكتلة} \times \text{التسارع} \qquad (٢,١,١)$$

ورمزيا: $F = m \cdot a,$

وفي لغة الحياة اليومية: رمي كرة بيسبول أسهل من رمي كرة بولينج (شكل ٢,١,١).

تذكر أنه في المعادلة (٢,١,١) اتجاه التسارع هو نفسه اتجاه القوة.

قانون نيوتن الثاني للحركة

القوة المؤثرة على جسم تساوي حاصل ضرب كتلة ذلك الجسم في تسارعه. اتجاه التسارع في نفس اتجاه القوة.

ولأنها معادلة، فإن طرفي المعادلة (١,١,١) متساويان. فتسارعك يساوي القوة المؤثرة عليك مقسومة على كتلتك. وبما أن كتلتك لن تتغير إلا إذا زرت مطعم وجبات خفيفة، فإن المعادلة (١,١,١) تشير إلى أن زيادة

القوة المؤثرة عليك تصاحبها زيادة مماثلة في تسارعك. بهذا الشكل، كلما حدثت زيادة في الطرف الأيمن من المعادلة فإن الطرف الأيسر يزيد أيضا لإبقاء الطرفين متساويان. هكذا، كلما زادت قوة دفع شيء عليك، زادت سرعة التغير في سرعتك.

كما يمكننا مقارنة التأثير الناتج عن قوتين متساويتين على كتلتين مختلفتين، فعلى سبيل المثال التأثير عليك وعلى مصارع السومو سابقا والذي على يسارك. معادلة (١,١,١) تشير إلى أن زيادة في الكتلة يجب أن يصاحبها تناقص مماثل في التسارع. بالتأكيد، فإن سرعتك تتغير بشكل أسرع من سرعة مصارع السومو عندما تؤثر على كليكما قوة متماثلة (شكل ٣,١,١).

لقد اكتشفنا إلى الآن خمسة مبادئ:

١. موقعك يحدد بالضبط مكان وجودك.
٢. سرعتك تقيس سرعة تغير موقعك.
٣. تسارعك يقيس سرعة تغير سرعتك.
٤. لكي تتمكن من التسارع، يجب أن تؤثر عليك قوة.
٥. كلما كانت كتلتك أكبر، تعرضت لتسارع أقل لأي قوة محددة.

بإذن من لوي بلومفيلد



(شكل ١-١-٣)إذا دفعت هذين المتزلجين بنفس المقدار، فإن الفتى سيتسارع بسرعة أكبر من الفتاة وذلك لأن كتلة الفتاة أكبر من كتلة الفتى.

كما أننا صادفنا خمس كميات فيزيائية مهمة - الكتلة، والقوة، والتسارع، والسرعة، والموقع - بالإضافة إلى بعض القوانين التي تربط بعضهم بالآخر. معظم أساسيات الفيزياء تستند على هذه الكميات الخمسة وعلى علاقاتهم المتبادلة.

بالتأكيد يعتمد التزلج على هذه الكميات، يمكننا الآن رؤية أنه، في ظل غياب أي قوة أفقية، فإنك إما أن تبقى ساكنا أو تسير بسرعة ثابتة. لتبدأ، أو تتوقف، أو تنحرف، لابد من وجود شيء يدفعك أفقيا، وهذا الشيء هو الجليد أو الرصيف. لم نتحدث كيف تتحصل على قوى أفقية من الجليد أو الرصيف وسنترك هذه المسألة للأقسام الأخيرة. ولكن بينما أنت تتزلج، يجب أن تكون مدركا لهذه القوى وملاحظا كيف تقوم بتغيير سرعتك، أو اتجاه سيرك أو كليهما. وتعلّم أن تراقب نفسك عندما تتسارع.

تحقق من فهمك #٣ : صعوبة التوقف (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

إن إيقاف دراجة تسير نـحوك بسرعة 5 كيلومتر-لكل-ساعة (3 أميال-لكل-ساعة) أسهل من إيقاف سيارة تسير نـحوك بنفس السرعة، ما الذي يعلل هذا الاختلاف؟

دقق في أرقامك #١: في مسار البولينغ (للإجابة انظر صفحة ٣٣)

تأتي كرات البولينج بكتل مختلفة، افترض أنك تحاول أن ترمي بكرتين مختلفتين، إحداهما لها ضعف كتلة الأخرى. إذا دفعتهما بقوى متساوية، فأيهما ستتسارع بشكل أسرع وبأي مقدار؟

عدد من المتزلجين: الأطر المرجعية

بينما يكون التزلج منفرداً يسوده الهدوء، في الغالب يكون أكثر مرحا في حين وجود متزلجين آخرين. بهذا، يكون هناك أناس تتحدث معهم وجمهور تريهم مهاراتك الرياضية والفنية. ولكن بوجود متزلجين آخرين يتزحلقون على الجليد في الوقت ذاته، هناك سؤال عن المنظور. بينما تتزلج بثبات متخطيا صديق، فإن كليكما يرى العالم بشكل مختلف بعض الشيء. من منظورك، فأنت لا تتحرك وصديقك يتحرك. ولكن من منظور صديقك، فإن صديقك لا يتحرك وأنت الذي تتحرك. فمن منكما على حق؟

يظهر أنكما الاثنين على حق، وأن الفيزياء لديها طريقة للتوفيق بين هذا التناقض الظاهر. كل منكما يشاهد العالم من إطار مرجعي قصوري مختلف، من منظور جسم قصوري - جسم لا يتسارع ويتحرك وفقا لقانون نيوتن الأول. أحد الاكتشافات الرائعة لغاليليو ونيوتن هو أن الفيزياء تعمل على نـحو كامل في أي إطار

مرجعي قصوري. من الإطار المرجعي القصوري، أي شيء تشاهده في العالم من حولك يتبع قوانين الحركة والتي نحن بصدد تعلمها.

بما أنك وصديقك تسيران، فإن كل واحد منكما يرى العالم من خلال إطار مرجعي قصوري، ويرى الأجسام المحيطة تتحرك بتوافق تام مع قوانين الحركة. بعض الأجسام تتحرك بسرعة ثابتة والبعض يتسارع استجابة لقوى. ولكن لأن كليكما تلاحظان هذه الأجسام من أطر قصورية مختلفة، فإنكما ستختلفان حول القيم المعينة لبعض الكميات الفيزيائية التي قد تقيسانها.

في الوضع الحالي، فإنك ترى نفسك ساكنا لأنك ترى العالم من إطارك القصوري. في هذا الإطار، صديقك يسير باتجاه الغرب بسرعة مقدارها 2 متر/ثانية (6.6 قدم/ثانية). ولكن صديقك يرى الأشياء بشكل مختلف. ففي الإطار القصوري لصديقك، فإن صديقك ساكن وأنت تتحرك باتجاه الشرق بسرعة 2 متر/ثانية. طالما أنكما لن تحاولا مقارنة مواقع وسرعات الأجسام التي تشاهدانها، أو أي كمية فيزيائية أخرى مشتقة منهما، فلن يكون هناك أي اختلاف أو تناقض بينكما. ولكن إذا نسيت أن تراقب سيرك وانتهى بك المطاف بالاصطدام بحائط، فلا تتوقع من صديقك أن يتعاطف معك عندما تدعي أنك كنت ساكنا وأن الحائط المتحرك اصطدم بك. ليس هذا ما رآه صديقك.

كلما قمنا بفحص جسم ما في هذا الكتاب سنختار إطاراً مرجعياً قصورياً معيناً نرى من خلاله هذا الجسم. في العادة سنختار الإطار القصوري الذي يجعل الجسم وحركته يبدوان على أبسط شكل ممكن، ثم نلتزم بهذا الإطار ونثبت عليه. الاختيار الأفضل للإطار القصوري سيكون عادة واضحا جدا، بحيث أننا نتبناه دون أي تفكير. ولكن أحيانا سنحتاج أن نختار الإطار بعناية وتعمد. وأخيرا، على الرغم من وجود طرق رسمية للتعامل مع إطارين قصوريين أو أكثر في آن واحد، سنترك هذا الموضوع لكتاب آخر.

تحقق من فهمك # ٤: منظوران (للإجابة انظر صفحة ٣٢)

أنت تقف على الرصيف وتشاهد قطاراً يسير شرقاً بسرعة ثابتة. صديقك راكب في هذا القطار. في إطاره المرجعي القصوري، فإن الكنزة الموجودة في حضنه ساكنة. صف حركة الكنزة في إطارك المرجعي القصوري.

القياس من أجل القياس

أهمية الوحدات

إذا ذهبت إلى متجر وطلبت «6 سكر»، فإن البائع لن يعرف كم كمية السكر التي يعطيك إياها. العدد 6 ليس معلومة كافية؛ يجب أن تحدد ما هي الوحدة - أكواب، أرطال، مكعبات، أو أطنان - التي تعنيها. هذه الحاجة لتحديد الوحدات تنطبق على جميع الكميات الفيزيائية تقريباً - السرعة، القوة، الكتلة، الخ - وقادت مجتمعنا إلى إنشاء وحدات يتفق عليها الجميع، وهي ما تعرف بالوحدات القياسية.

على سبيل المثال، عندما تقول أن سرعة متزلج هي 20 ميل-لكل-ساعة، فإنك قد اخترت «ميل-لكل-ساعة» كوحدة قياسية للسرعة وأنت تؤكد أن المتزلج يسير بسرعة 20 ضعفاً لهذه الوحدة. يمكنك التعبير عن سرعة المتزلج كمضاعفات أي وحدة قياسية للسرعة، على سبيل المثال لا الحصر، قدم-لكل-ثانية، ياردة-لكل-يوم، بوصة-لكل-قرن. كما يمكنك أيضا إيجاد علاقات بسيطة للتحويل بين وحدة سرعة وأخرى. مثلا، للتحويل من ميل-لكل-ساعة إلى كيلومتر-لكل-ساعة، تقوم بالضرب بالعدد 1.609km/mile. باستخدام هذه الطريقة ستجد أن سرعة المتزلج هي 32.2 كيلومتر-لكل-ساعة.

إن العديد من الوحدات المتعارف عليها في الولايات المتحدة منشؤها نظام الوحدات البريطاني القديم، والتي تخلى عنها العالم لصالح النظام العالمي للوحدات Systéme International d›Unités (SI). إن الاستمرار في استعمال الوحدات الإنجليزية في الولايات المتحدة الأمريكية كثيراً ما يجعل الحياة صعبة. إذا كان عليك أن تضاعف ثلاث مرات مقادير وصفة كعك، والتي تحتاج إلى ¾ كوب من الحليب، فإنه يتحتم عليك أن تجتهد في القيام بعمليات حسابية لتصل إلى أنك تحتاج ¼ 2 كوب. فتذهب لشراء ¼ 2 كوب من الحليب، والتي هي أكثر بقليل من نصف الكوارت (الكوارت هو ربع جالون)، ولكن ينتهي بك المطاف لشراء اثنين من الباينت (الباينت هو ثُمن الجالون أو نصف لتر). والآن أصبح لديك 14 أونصة (الأونصة هي 31 جرام) من الحليب أكثر من احتياجك. ولكن هل هذه الـ 14 أونصة الزائدة هي أونصة سائلة أم أونصة

وزن؟ وهكذا.

نظام الوحدات العالمي SI له خاصيتان مهمتان تميزه عن النظام البريطاني، والتي تجعله أكثر سهولة في الاستعمال:

١. الوحدات المختلفة لنفس الكمية الفيزيائية ترتبط ببعضها بمضاعفات المعامل 10.

٢. معظم الوحدات مبنية من بضع وحدات أساسية: المتر، والكيلوجرام، والثانية.

لنبدأ بالخاصية الأولى: الوحدات المختلفة لنفس الكمية الفيزيائية ترتبط ببعضها بمضاعفات المعامل 10. عند قياس الحجم، فإن 1000 ميليلتر هي تماما 1 لتر والـ 1000 لتر هي تماما 1 متر^3. وعند قياس الكتلة، فإن 1000 جرام هي تماما 1 كيلوجرام كما أن 1000 كيلوجرام هي تماما 1 طن متري. بسبب هذه العلاقة الثابتة، فإن مضاعفة مقادير وصفة طعام مبنية على نظام SI سيكون بسهولة ضرب بضعة أرقام، فلا يجب عليك التفكير في تحويل الباينت إلى كوارت، وملعقة شاي إلى ملعقة طعام، أو الأونصة إلى أرطال. بل إذا أردت مضاعفة وصفة تحتاج 500 ميليلتر من السكر ثلاث مرات، فقط تضرب الكمية بـ 3 لتحصل على 1500 ميليلتر من السكر. وبما أن 1000 ميليلتر هو 1 لتر، فإنك إذاً تحتاج إلى 1.5 لتر من السكر، وعملية التحويل من الميليلترات إلى لترات هي بسهولة الضرب بالعدد 0.001L/mL. (انظر ملحق ب لمعرفة المزيد من معاملات التحويل).

تظل وحدات النظام العالمي غامضة بعض الشيء لكثير من سكان الولايات المتحدة، حتى مع ظهور بعض الوحدات الأساسية ببطء في أرفف بقالاتنا ولوحات الطرق السريعة. لذلك، فإن تنمية الشعور ببعض الوحدات العالمية ما تزال صعبة على الرغم من منطقية وحدات النظام العالمي مقارنة بالنظام البريطاني القديم. كم منا يعرف طوله بوحدة المتر (وحدة النظام العالمي للطول) أو كتلته بالكيلوجرام (وحدة النظام العالمي للكتلة)؟ إذا كانت سيارتك تسير بسرعة 200 كيلومتر-لكل-ساعة وتجاوزت سيارة شرطة المرور، هل أنت في مأزق؟ نعم، لأن 200 كيلومتر-لكل-ساعة هو حوالي 125 ميل-لكل-ساعة. في الحقيقة، الساعة ليست وحدة أساسية في النظام العالمي – وحدة الزمن الأساسية هي الثانية - ولكن تظل الساعة هي المألوفة عند وصف فترات الزمن الطويلة. لذا فإن وحدة الكيلومتر-لكل-ساعة نصفها متوافق مع النظام العالمي (جزء الكيلومتر) بينما النصف الآخر عرفي (جزء الساعة).

الخاصية الثانية لنظام الوحدات العالمي، وهي قلة عدد الوحدات الأساسية نسبيا. إلى الآن تعرفنا على الوحدات العالمية للكتلة (الكيلوجرام واختصاراً kg)، والطول (المتر واختصاراً m)، والزمن (الثانية واختصاراً s). فالكيلوجرام الواحد هو حوالي كتلة لتر من الماء؛ والمتر الواحد هو حوالي طول خطوة واسعة؛ والثانية الواحدة هي الزمن الذي نستغرقه لقول العبارة «موزة واحدة». من هذه الثلاث وحدات الأساسية يمكننا تكوين العديد من الوحدات الأخرى، مثل وحدة السرعة في النظام العالمي (وهي متر-لكل-ثانية، اختصاراً m/s) ووحدة التسارع (متر-لكل-ثانية^2، اختصاراً m/s^2). فمتر واحد-لكل-ثانية هي سرعة المشي الصحي؛ ومتر واحد-لكل-ثانية^2 هو تسارع مصعد بعد انغلاق بابه والبدء بالصعود للأعلى. هذا الاقتناع بأن الأفضل لبناء الوحدات هو استخدام وحدات أخرى أساسية يبسّط النظام العالمي بشكل مبهر. النظام البريطاني لا يخضع لمثل هذه العقلانية.

وحدة النظام العالمي الخاصة بالقوة هي أيضا مشتقة من الوحدات الأساسية للكتلة، والطول، والزمن. عندما نختار جسماً كتلته 1kg ونتساءل عن مقدار القوة اللازمة لجعل هذا الجسم يتسارع بمقدار $1 m/s^2$ فإننا نعرّف كمية محددة من القوة. بما أن 1kg هو وحدة النظام العالمي للكتلة و m/s^2 هي وحدة النظام العالمي للتسارع، فإنه من المنطقي جعل القوة التي تحدث هذا التسارع هي وحدة القوة في النظام العالمي للوحدات: الكيلوجرام-متر-لكل-ثانية^2. وحيث أن هذه الوحدة المركبة تبدو ثقيلة على الرغم من أهميتها، فإنه تم إعطاؤها اسماً خاصاً بها وهو النيوتن (اختصارا N) نسبة للعالم نيوتن، والذي يوضح قانونه الثاني العلاقة بين الكتلة والطول والزمن والتي تبينه هذه الوحدة. إن نيوتن واحد هو حوالي وزن 18 عملة نقدية فئة الربع دولار أمريكي؛ فإذا حملت في كفك هذه الـ 18 عملة فإنك ستشعر بقوة متجهة للأسفل مقدارها حوالي 1 نيوتن.

بما أن الانتقال الكامل لنظام الوحدات العالمي سيتطلب تعاقب أجيال، لذا فإننا في هذا الكتاب سنستخدم كلا النظامين ما أمكن. على الرغم من أننا سنركز على النظام العالمي، إلا أن النظام البريطاني والوحدات المتعارف عليها قد تعطيك شعوراً حدسياً لكمية فيزيائية معينة. فقطار سريع يسير بسرعة «67 متر-لكل-ثانية» قد لا يتلمسها الكثير منّا، بينما «150 ميل-لكل-ساعة» (150 mph) أو «240 كيلومتر-لكل-ساعة» (240 km/h) يستحق أن يجلب تقديرنا.

الكمية	وحدة النظام العالمي *SI*	وحدة النظام البريطاني	*SI* ← النظام البريطاني	النظام البريطاني ← *SI*
الموقع	متر (m)	قدم (ft)	1m = 3.2808 ft	1ft = 0.30480 m
السرعة	متر-لكل-ثانية (m/s)	قدم-لكل-ثانية (ft/s)	1m/s = 3.2808 ft/s	1ft/s = 0.30480 m/s
التسارع	متر-لكل-ثانية² (m/s^2)	قدم-لكل-ثانية² (ft/s^2)	$1m/s^2 = 3.2808\ ft/s^2$	$1ft/s^2 = 0.30480\ m/s^2$
القوة	نيوتن (N)	باوند-قوة (lbf)*	1N = 0.22481 lbf	1lbf = 4.4482 N
الكتلة	كيلوجرام (kg)	باوند-كتلة (lbm)*	1kg = 2.2046 lbm	1lbm = 0.45359 kg

* الوحدة البريطانية لكل من القوة والكتلة تسمى باوند. للتفريق بين هاتين الوحدتين، فلقد أصبح من الإجراءات المتبعة تعريفهما بـ باوند-قوة و باوند-كتلة

تحقق من فهمك # ٥ السير

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

إذا كنت تسير بسرعة 1m/s، فكم ميلا ستقطعها في ساعة؟



١-٢ الكرات الساقطة

قمنا جميعنا بإسقاط كرات من أيدينا أو رأيناها تتبع برشاقة مساراً مقوساً في الهواء بعد قذفها. هذه الحركات هي البساطة ذاتها، وليس من المستغرب أن يحكمها فقط بضعة قوانين كونية. لقد تعرفنا على العديد من تلك القوانين في القسم السابق، ولكننا على وشك أن نفحص أول نوع مهم من القوى: وهو الجاذبية.

ومثل نيوتن، والذي قيل أنه بدأ بحثه بعد رؤيته لتفاحة تسقط من شجرة، سنبدأ ببساطة باستكشاف الجاذبية وتأثيرها على حركة الأجسام الساقطة.

أسئلة للتفكير

ماذا نعني بـ «السقوط»، ولماذا تسقط الكرات؟ أيهما يسقط أسرع: كرة ثقيلة أم كرة خفيفة؟ هل الكرة التي تتجه للأعلى لا تزال في حالة سقوط؟ كيف تؤثر الجاذبية على كرة مقذوفة جانبيا؟

تجارب يمكن القيام بها

بضع ثوانٍ مع كرة البيسبول سوف تساعدك في رؤية بعض السلوكيات التي سنستكشفها. ارمِ الكرة إلى الأعلى لارتفاعات مختلفة وقم بالتقاطها بيدك عند عودتها. دع صديقك يقوم بحساب زمن رحلة الكرة. عندما ترمي بالكرة لارتفاعات أكبر، فكم الزيادة في الزمن الذي تمكثه الكرة في الهواء؟ كيف يكون الشعور عندما تعود الكرة ليديك؟ هل هناك فرق في التصادم الذي تحدثه؟ أي الفترتين التي تستغرقها الكرة أطول: الصعود من يدك إلى أن تصل قمة ارتفاعها أم العودة من قمة ارتفاعها إلى يدك؟
والآن أسقط كرتين مختلفتين - مثلا كرة بيسبول وكرة غولف. إذا أسقطتهما في آن واحد، دون دفع أي منهما للأعلى أو للأسفل، هل سترتطم إحدى الكرتين بالأرض قبل الأخرى، أم أنهما ستصلان للأرض معاً؟ والآن ارمِ إحدى الكرتين بشكل أفقي بينما تُسقط الأخرى. إذا غادرت الكرتان يديك في نفس اللحظة وحركة الكرة الأولى أفقية تماما، أيهما ستصل للأرض أولا؟

الوزن والجاذبية

إن الكرة مثلها مثل جميع الأشياء التي من حولنا لها وزن. على سبيل المثال، كرة الغولف لها وزن حوالي 0.10N (0.45lbf) ولكن ما هو الوزن؟ من الواضح أنه قوة، لأن كلا الوحدتين N و lbf هي وحدات قوة. ولكن لفهم حقيقة الوزن - وبالتحديد ما هو مصدره - نحتاج أن ننظر للجاذبية.



شكل 1.2.1: كرة تواجه قوة الجاذبية. تتسارع الكرة للأسفل.

الجاذبية هي ظاهرة طبيعية تُنتج قوة جذب بين كل زوجين من الأجسام في الكون. ولكن في حياتنا اليومية، الجسم الوحيد الذي هو ضخم وقريب بما فيه الكفاية لإحداث تأثير جذبي واضح علينا هو كوكبنا، الأرض. تضعف قوة الجاذبية مع زيادة المسافة، والقمر والشمس بعيدان لدرجة أننا نرى جاذبيتهما فقط من خلال تأثيرات دقيقة كالمد والجزر في مياه المحيطات.

تؤثر جاذبية الأرض بقوة جذب للأسفل على أي جسم قريب من سطحها. ينجذب هذا الجسم نحو مركز الأرض مباشرة بقوة نسميها وزن الجسم (شكل ١,٢,١). ومن الملفت جدا أن هذا الوزن يتناسب تماما مع كتلة الجسم – فإذا كان لكرة ضعف كتلة كرة أخرى، فإن وزنها سيكون ضعف وزن الكرة الأخرى أيضا. مثل هذه العلاقة التي بين الوزن والكتلة مدهشة لأن الوزن والكتلة مختلفان تماما في الخواص: الوزن هو شدة جذب الأرض للكرة، والكتلة هي مقدار صعوبة تسارع الكرة. ونظراً لهذا التناسب، فإن الكرة الثقيلة يصعب هزّها أيضاً!

كما أن وزن الجسم يتناسب مع قوة الجاذبية الموضعية، والتي تقاس بمتجه يشير إلى الأسفل يسمى بالتسارع بسبب الجاذبية. سوف نشرح هذا الاسم الغريب قريبا، ولكن عند مستوى سطح الأرض فإن التسارع بسبب الجاذبية هو حوالي 9.8N/kg (1.0lbf/lbm). هذه القيمة تعني أن الجسم الذي كتلته 1kg له وزن مقداره 9.8N، وأن الجسم الذي كتلته 1lbm له وزن مقداره 1lbf.

بصفة عامة، إن وزن الجسم يساوي حاصل ضرب كتلته في تسارعه الذي سببه الجاذبية، ويمكن كتابة هذه العلاقة لفظيا:

الوزن = الكتلة × التسارع بسبب الجاذبية (١,٢,١)

ورمزيا: $w = m \times g$

وفي لغة الحياة اليومية: يمكنك أن تقلل وزنك إما بإنقاص كتلتك أو بالذهاب إلى مكان آخر، مثلا كوكب صغير، حيث قوة جاذبيته أضعف.

ولكن لماذا التسارع بسبب الجاذبية؟ وما هو التسارع الذي نعني؟ للإجابة على هذا السؤال دعنا نتأمل ماذا يحدث لكرة عندما تسقطها.

إذا كانت القوة الوحيدة المؤثرة على الكرة هي وزنها، فإن الكرة ستتسارع إلى الأسفل؛ بعبارة أخرى، إنها تسقط. على الرغم من أن الكرة التي تتحرك خلال الهواء تتعرض لقوى إضافية ناتجة عن مقاومة الهواء، فدعنا نهمل هذه القوى في الوقت الحالي. القيام بذلك سيجعلنا نخسر فقط قليلا من الدقة – فتأثير مقاومة الهواء يكاد يكون مهملا طالما أن الكرة ذات كثافة عالية وسرعتها قليلة نسبياً– ولكنه سيسمح لنا بالتركيز على تأثير الجاذبية بشكل خاص.

ما هو مقدار تسارع الكرة الساقطة؟ وفقا لمعادلة (١,١,١)، فإن تسارع الكرة يساوي مقدار القوة المؤثرة عليها مقسوما على كتلتها. ولكن لأن الكرة في حالة سقوط، فإن القوة الوحيدة المؤثرة عليها هي وزنها. هذا الوزن، وفقا لمعادلة (١,٢,١)، يساوي كتلة الكرة مضروبا بالتسارع الذي سببه الجاذبية. باستخدام الجبر اللفظي فإننا نحصل على:

$$\text{تسارع كرة ساقطة} = \frac{\text{وزن الكرة}}{\text{كتلة الكرة}}$$

$$= \frac{\text{كتلة الكرة . التسارع بسبب الجاذبية}}{\text{كتلة الكرة}}$$

$$= \text{التسارع بسبب الجاذبية}$$

كما ترى، فإن تسارع الكرة الساقطة يساوي التسارع بسبب الجاذبية، لذا فإن التسارع بسبب الجاذبية هو تسارع حقا: وهو تسارع جسم يسقط سقوطا حرا. علاوة على ذلك، يمكننا تحويل وحدات التسارع بسبب الجاذبية من الوحدة التي تربط الوزن بالكتلة، 9.8N/kg (1.0lbf/lbm)، إلى الوحدات التي تصف تسارع السقوط الحر، $9.8m/s^2$ ($32ft/s^2$).

وهكذا، فإن كرة ساقطة على مقربة من سطح الأرض تواجه تسارعاً للأسفل مقداره $9.8m/s^2$ ($32 ft/s^2$) بغض النظر عن كتلتها. هذا التسارع للأسفل هو أكبر كثيراً من تسارع مصعد يبدأ في الهبوط. فعندما تسقط كرة فإنها تكتسب سرعة بشكل سريع في الاتجاه السفلي.

لأن جميع الأجسام الساقطة عند سطح الأرض تتسارع للأسفل بنفس المعدل بالضبط، فإن كرة البيلياردو وكرة البولنج عندما تُسقَط آنيا من نفس الارتفاع، فإنها ستصل إلى الأرض سويّة. (تذكر أننا لم نأخذ في الاعتبار مقاومة الهواء إلى الآن).

بالرغم من أن كرة البولنج لها وزن أكبر من كرة البلياردو، ولكنها أيضا لها كتلة أكبر؛ فبينما تواجه كرة البولنج قوة جذب كبيرة للأسفل إلا أن كتلتها الكبيرة أيضا تعمل على جعل تسارعها للأسفل مساويا لتسارع كرة البيلياردو الأخف وزنا وكتلة.

تحقق من فهمك #١ : الوزن والكتلة (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

في الفضاء البعيد، وبعيدا عن أي جرم سماوي له جاذبية ذات قيمة، هل سيكون لرائد الفضاء وزن؟ هل سيكون لهذا الرائد كتلة؟

دقق في أرقامك #١: وزنك على القمر (للإجابة، انظر صفحة ٣٣)

أنت في مركبتك الفضائية على سطح القمر. قبل ارتدائك لسترتك، تزن نفسك وتجد أن وزنك تقريبا سدس ما هو على كوكب الأرض. فما هو التسارع بسبب الجاذبية الخاص بالقمر؟

سرعة كرة ساقطة

نحن الآن على استعداد لدراسة حركة سقوط كرة على مقربة من سطح الأرض. الكرة الساقطة هي التي تؤثر عليها قوة الجاذبية فقط، والجاذبية، كما رأينا سابقا، تتسبب في تسارع سفلي بمعدل ثابت لأي جسم في حالة سقوط. لكننا في الغالب لا نهتم كثيرا بتسارع الجسم الساقط مقارنة باهتمامنا بموقع الجسم وسرعته. أين سيكون الجسم بعد ثلاث ثوانٍ؟ وما هي سرعته عند هذه اللحظة؟ عندما تحاول أن تستجمع شجاعتك للقفز من منصة غطس عالية، ستريد معرفة كم من الوقت ستأخذ للوصول للماء وما هي سرعتك عندما تصطدم بسطحه؟

الخطوة الأولى للإجابة على هذه الأسئلة هي معرفة ارتباط سرعة الكرة بالفترة الزمنية التي استغرقتها أثناء مشاهدتك لسقوطها. لتقوم بذلك ستحتاج أن تعرف سرعة الكرة الابتدائية، أي السرعة والاتجاه في اللحظة التي بدأت تراقب الكرة فيها. إذا أسقطت الكرة من السكون فإن سرعتها الابتدائية هي صفر.

تسارع	سرعة	زمن السقوط	موقع
$-9.8\ m/s^2$	0 m/s	0 s	0 m
$-9.8\ m/s^2$	−9.8 m/s	1 s	−4.9 m
$-9.8\ m/s^2$	−19.6 m/s	2 s	−19.6 m
$-9.8\ m/s^2$	−29.4 m/s	3 s	−44.1 m

شكل ٢،٢،١: في اللحظة التي تترك فيها الكرة يدك فإنها ستبدأ بالسقوط. وزنها يتسبب في تسارعها للأسفل. بعد ثانية واحدة، تكون الكرة قد قطعت مسافة مقدارها 4.9m وأصبحت سرعتها باتجاه الأسفل مقدارها 9.8m/s. وبعد ثانيتين، تكون الكرة قد قطعت مسافة مقدارها 19.6m وسرعتها 19.6m/s للأسفل، وهكذا. بينما تستمر الكرة في التسارع للأسفل، فإن سرعتها ستستمر بالزيادة للأسفل. القيم السالبة للمسافة والسرعة هي لتوضيح اتجاه الحركة للأسفل بسبب التسارع السالب أو المتجه للأسفل.

عندها يمكنك وصف سرعة الكرة الحالية بدلالة سرعتها الابتدائية، وتسارعها، والوقت الذي انقضى منذ أن بدأت مراقبتها. ولأن التسارع الثابت يؤدي إلى تغير السرعة بكميات متساوية في كل ثانية، فإن سرعة الكرة الحالية تختلف عن السرعة الابتدائية بمقدار هو حاصل ضرب التسارع في الزمن الذي استغرقته في المراقبة. يمكننا ربط هذه الكميات بالمعادلة اللفظية:

السرعة اللحظية = السرعة الابتدائية + التسارع × الزمن (2.2.1)

ورمزيا: $v = v_o + a \,.\, t$

وفي لغة الحياة اليومية: ينزل حجر أُسقط من السكون بشكل أسرع مع كل ثانية منقضية، ولكن يمكنك أن تعطيها دفعة سرعة زائدة برميها للأسفل بدلا من مجرد تركها تسقط.

الكرة التي تسقط من السكون تكون سرعتها الابتدائية صفر، وتسارعها للأسفل مقداره $9.8\ m/s^2$ $(32ft/s^2)$، والزمن الذي قضيته في مشاهدتها هو ببساطة الزمن منذ أن بدأت الكرة في السقوط (شكل ٢,٢,١). بعد ثانية واحدة، تكون سرعة الكرة للأسفل هي 9.8m/s (32ft/s). وبعد ثانيتين، سرعتها للأسفل هي 19.6m/s (64ft/s). وبعد ثلاث ثوانٍ سرعتها للأسفل هي 29.4m/s (96ft/s)، وهكذا. ولأن حركة الكرة هي رأسية بحتة، فإننا في الغالب نضع إشارة سالبة أمام التسارع للإشارة للاتجاه. والمتفق عليه هو أن الإشارة السالبة تعني «للأسفل».

تحقق من فهمك # ٢ : نصف سقوط (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

قمت بإسقاط كرة بلية (برجون) من السكون، وبعد ثانية واحدة، أصبحت سرعتها 9.8m/s 32ft/s وباتجاه الأسفل. ماذا كانت سرعتها بعد فقط 0.5s من السقوط؟

دقق في أرقامك # ٢: الغطس من عُلوٍّ (للإجابة، انظر صفحة ٣٣)

إذا استغرقت حوالي 1.4s لتصل للماء من منصة غطس ارتفاعها 10m (32ft)، فما هي سرعتك قبل دخولك للماء بلحظة؟

موقع كرة ساقطة

إن سرعة الكرة الساقطة تتزايد أثناء سقوطها، ولكن أين بالضبط موقع الكرة؟ للإجابة على ذاك السؤال، تحتاج أن تعرف موقع الكرة الابتدائي، أي، أين كان موقعها عندما بدأت بمراقبة سقوطها. إذا أسقطت الكرة من السكون، فإن موقع الكرة الابتدائي كان يدك ويمكنك تحديد هذه النقطة بالصفر.

عندئذ، يمكنك وصف موقع الكرة الحالي بدلالة موقعها الابتدائي، وسرعتها الابتدائية، وتسارعها، والزمن المنقضي منذ أن بدأت في مراقبتها. ولكن بما أن سرعة الكرة تتغير، فإنك لا تستطيع ببساطة أن تضرب سرعتها الحالية بالزمن الذي قضته في السقوط لمعرفة مقدار تغير موقع الكرة الحالي عن موقعها الابتدائي. بدلا من ذلك، يجب عليك أن تستخدم متوسط سرعة الكرة خلال الفترة الكلية التي قمت بمراقبتها فيها. وبما أن سرعة الكرة تغيرت بشكل منتظم ابتداء من قيمتها الابتدائية إلى قيمتها الحالية، فإن سرعتها المتوسطة ستكون بالضبط عند منتصف هاتين القيمتين:

السرعة المتوسطة = السرعة الابتدائية + $\frac{1}{2}$× التسارع × الزمن

يختلف موقع الكرة الحالي عن موقعها الابتدائي بمقدار هو حاصل ضرب هذه السرعة المتوسطة بالزمن الذي استغرقته في مشاهدتها. يمكننا أن نربط بين هذه الكميات بالمعادلة اللفظية:

الموقع الحالي = الموقع الابتدائي + السرعة الابتدائية · الزمن + $\frac{1}{2}$× التسارع × (الزمن)^2 (٣,٢,١)

ورمزياً
$$x = x_0 + v_0 . t + ½ . a . t^2$$

وبلغة الحياة اليومية: كلما زاد زمن سقوط حجر، قلّ ارتفاعه مع مرور كل ثانية. ولكنه لن يتجاوز حجراً آخر أُسقط من موقع محاذ له في لحظة زمنية سابقة أو أسقط من موقع أسفل منه في نفس لحظة سقوطه.

لكرة تسقط من السكون سرعة ابتدائية مقدارها صفر، وتسارع للأسفل مقداره$9.8 m/s^2$ ($32 ft/s^2$)، والزمن الذي قضيته في مراقبتها هو الزمن منذ أن بدأت بالسقوط (شكل 2.2.1). بعد ثانية واحدة، تكون الكرة قد سقطت مسافة مقدارها 4.9m (16ft). بعد ثانيتين، تكون الكرة قد سقطت مسافة كلية مقدارها 19.6m (ft 64). بعد ثلاث ثوانٍ، تكون الكرة قد سقطت مسافة كلية مقدارها 44.1m (145ft)، وهكذا.
تعتمد المعادلتان (2.2.1) و(3.2.1) على تعريف التسارع على أنه مقياس سرعة تغير السرعة، وتعريف السرعة على أنها مقياس سرعة تغير الموقع. ولأن تسارع الكرة الساقطة لا يتغير مع الزمن، فإنه يمكن اشتقاق هاتين المعادلتين باستخدام حساب الجبر. ولكن في الحالات الأكثر تعقيدا، والتي يتغير فيها تسارع الجسم مع الزمن، فإن التنبؤ بموقع وسرعة الكرة يتطلب في العادة استخدام حساب التفاضل والتكامل. إن حساب التفاضل والتكامل هو حساب التغير، وقد اخترعه نيوتن لمعالجة مثل هذه المسائل.

قمنا بمناقشة ماذا يحدث لكرة في حالة سقوط، ولكن كان بإمكاننا اختيار أي جسم آخر بديل. كل الأشياء تسقط بنفس الكيفية؛ سواء كانت ثقيلة أم خفيفة، كبيرة أم صغيرة، وجميع الأجسام تستغرق نفس الزمن لتسقط لمسافة ما بالقرب من سطح الأرض، طالما أن هذه الأجسام كثيفة بما فيه الكفاية للتغلب على مقاومة الهواء. إذا لم يكن هناك هواء، فإن العبارة السابقة تكون صحيحة تماما لأي جسم؛ فالريشة وطوب من الرصاص سيهبطان للأسفل سوية إذا أسقطتهما آنيا.

شكل ٣,٢,١ : بمجرد أن تترك كرة قذفت للأعلى فستبدأ بالتسارع إلى الأسفل بمقدار $9.8m/s^2$. ستستمر الكرة في الصعود ولكن سرعتها للأعلى ستتناقص بشكل ثابت إلى أن تتوقف لحظيا. بعد ذلك ستهبط الكرة بتزايد سرعتها إلى الأسفل باطراد. في هذا المثال، ترتفع الكرة لمدة ثلاث ثوانٍ إلى أن تقف. بعدها تهبط لمدة ثلاث ثوانٍ قبل أن تعود ليدك بعد رحلة متناظرة تماما.

والآن وقمنا بدراسة التسارع بسبب الجاذبية، يمكننا معرفة لماذا تكون الكرة الساقطة من سلّم طويل أكثر خطورة من سقوطها من مقعد قصير. كلما كانت مسافة سقوط الكرة أطول، فإنها ستحتاج زمناً أطول لكي تصل إلى الأرض، أي لديها زمن أطول لكي تتسارع. فالكرة أثناء سقوطها الطويل من السلم الطويل ستكتسب سرعة كبيرة للأسفل ويصبح من الصعب إيقافها. إذا حاولت أن تمسك بها، فإنه سيتحتم عليك أن تبذل عليها قوة كبيرة جداً للأعلى لجعلها تتسارع للأعلى وتوصلها للسكون سريعا. بذل تلك القوة في اتجاه الأعلى قد يؤذي يدك.

هذه هي الفكرة ذاتها لو كنت أنت الجسم الساقط. فإذا قفزت من على سلم طويل، فسيمضي وقت طويل قبل أن تصل إلى الأرض. فخلال الوقت الذي ستستغرقه قبل اصطدامك بالأرض تكون قد اكتسبت سرعة كبيرة باتجاه الأسفل، عندها ستقوم الأرض بتسريعك للأعلى وتجلبك لحالة السكون عن طريق قوة كبيرة غير سارة باتجاه الأعلى. (لتطبيقات مثيرة وأقل ألما للسقوط من المرتفعات، انظر ٥[٤])

تحقق من فهمك # ٣: نصف سقوط مرة أخرى

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

قمت بإسقاط كرة بلية (برجون) من السكون، وبعد ثانية واحدة، تكون قد قطعت في الاتجاه للأسفل مسافة مقدارها 4.9m (16ft). فما هي المسافة التي قطعتها بعد 0.5s فقط من السقوط؟

دقق في أرقامك # ٣: فيزياء متطرفة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٣)

أنت تخطط لبناء لعبة قفز البنجي (Bungee) الترفيهية في مركز تسوقك المحلي. إذا أردت أن يحصل زبائنك على تجربة سقوط حر مدتها خمس ثوانٍ، فما هو ارتفاع البرج الذي تحتاج لبنائه لكي يقفزوا منه؟ (لا تقلق بشأن الارتفاع الإضافي المطلوب لتوقيف الأشخاص بعد أن يصبح حبل البنجي مشدودًا).

كيف تتحرك كرة مقذوفة : حركة المقذوفات

إذا كانت القوة الوحيدة المؤثرة على جسم هي وزنه، فالجسم يكون في حالة سقوط حر. لقد قمنا حتى الآن بدراسة هذا المبدأ على أنه يخص الكرات التي تسقط من وضع السكون. ولكن الكرة المقذوفة هي في حالة سقوط أيضا، حيث أنها بمجرد أن تترك يدك تكون فقط تحت تأثير قوة الجاذبية باتجاه الأسفل وبالتالي تسقط سقوطاً حراً. قد يبدو ذلك غريبا، ولكن على الرغم من أن حركة الكرة الابتدائية هي للأعلى إلا أن هذه الكرة المقذوفة للأعلى تتسارع إلى الأسفل بمقدار $9.8m/s^2$ ($32ft/s^2$). نتيجة لذلك، فإن سرعة الكرة في الاتجاه الأعلى تقل، ثم تتوقف عن الصعود، وبعدها تصبح سرعتها إلى الأسفل إلى أن تصل للأرض في نهاية المطاف.

مازالت معادلة (٢,٢,١) تصف كيف أن سرعة الكرة تعتمد على زمن السقوط، ولكن الآن السرعة الابتدائية ليست صفرا، وتتجه للأعلى! إذا قذفت كرة رأسيا للأعلى في الهواء فإنها ستترك يدك بسرعة كبيرة في اتجاه الأعلى (شكل ٣,٢,١). بمجرد أن تتركها فإنها ستبدأ بالتسارع للأسفل. فإذا كانت سرعة الكرة الابتدائية المتجهة للأعلى هي29.4m/s (96ft/s)، فإنها بعد ثانية واحدة تصبح السرعة المتجهة للأعلى 19.6m/s (64ft/s). بعد ثانية أخرى، فإن السرعة للأعلى ستصبح 9.8m/s (32ft/s) فقط. بعد ثانية ثالثة، تتوقف الكرة لحظيا وتكون سرعتها عندئذ صفرا. بعدها تبدأ الكرة بالهبوط من قمة ارتفاعها وتسقط كما كانت تفعل عندما أسقطتها من السكون.

رحلة الكرة قبل وبعد وصولها للقمة تأخذ شكلاً متناظراً، فهي تبدأ رحلتها للأعلى بسرعة في بادئ الأمر لأن

٥[٤] في عام ١٧٨٢م، قام وليام واتز، سباك من مدينة برستول البريطانية، بتسجيل براءة اختراع لتقنية تكوين كريات كروية تماما من الرصاص للاستعمال في الأسلحة كطلقات. كانت فكرته قائمة على أن يصب مصهور الرصاص من خلال منخل معلق عاليا فوق حوض من الماء. في هذه الحالة، فإن قطرات الرصاص سوف تبرد في الهواء أثناء سقوطها وتتحول إلى كرات صلبة قبل وصولها إلى الماء. ظهرت أبراج مبنية على هذه الفكرة في كافة أنحاء أوروبا وفي آخر الأمر ظهرت في الولايات المتحدة. في الوقت الحاضر، تم استبدال طلقات الرصاص الخطرة بيئيا بطلقات أخرى من الحديد. تسكب طلقات الحديد، بدلا من إسقاطها، وذلك لأن الزمن الأطول اللازم لتبريد الحديد وتجمد مصهوره سيتطلب استخدام أبراج مرتفعة جدا بشكل غير عملي لتكوينها.

لديها سرعة للأعلى كبيرة، وبينما تقل هذه السرعة للأعلى فإن الكرة ستتباطأ إلى أن تتوقف لحظيا. بعدها تبدأ بالهبوط بسرعة منخفضة في أول الأمر ثم أسرع وأسرع بسبب تسارعها الثابت للأسفل. الزمن الذي تستغرقه الكرة لتصعد من موقعها الابتدائي في يدك إلى أن تصل إلى قمة ارتفاعها هو مساوٍ تماما للوقت الذي تستغرقه في الهبوط من تلك القمة إلى يدك. معادلة (٣,٢,١) توضح كيف يعتمد موقع الكرة على زمن رحلتها، مع كون السرعة الابتدائية هي سرعة الكرة للأعلى لحظة مغادرتها ليدك.

كلما كانت السرعة الابتدائية المتجهة للأعلى كبيرة، زاد الزمن المستغرق لوصول الكرة للقمة وأيضا زادت مسافة ارتفاعها قبل أن تصبح سرعتها صفرا. بعد ذلك تبدأ بالهبوط من القمة مستغرقة نفس الزمن الذي أخذته للصعود إليها. وكلما زاد ارتفاع الكرة قبل أن تبدأ بالهبوط، زاد الزمن الذي تأخذه قبل أن تصل إلى الأرض وأيضا زادت سرعتها عند وصولها. هذا هو سبب الألم الناتج عن الإمساك بكرة طائرة سريعة بيديك المكشوفتين: الكرة تتحرك بسرعة كبيرة جداً جداً عندما تصطدم بيديك، وتحتاج قوة كبيرة لإيقاف الكرة بسرعة.

ماذا يحدث عندما لا ترمي الكرة رأسيا للأعلى؟ افترض أنك ترمي الكرة للأعلى بزاوية معينة. لا تزال الكرة ترتفع للأعلى إلى أن تصل لقمة ارتفاعها وبعد ذلك تبدأ بالهبوط. ولكن أثناء ارتفاعها وهبوطها هي أيضا تتحرك أفقيا بعيدا عنك لتسقط على الأرض على بعد مسافة ما من قدميك. إلى أي درجة من التعقيد ستضيفها هذه الحركة الأفقية على حركة الكرة الساقطة؟

الإجابة هي، ليس كثيرا. أحد التبسيطات الجميلة في الفيزياء هو أنه يمكننا معالجة حركة الجسم الرأسية بشكل مستقل عن حركته الأفقية. هذا الأسلوب يتضمن فصل الكميات المتجهة – التسارع، والسرعة، والموقع – إلى مركبات، والتي هي أجزاء من الكميات التي تمتد على طول اتجاهات معينة (شكل ١,٢,٤). على سبيل المثال، فإن المركبة الرأسية لموقع جسم هي ارتفاع الجسم.

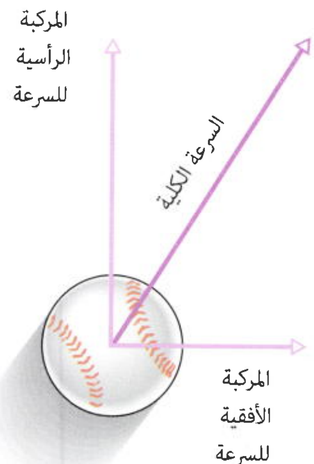
إذا كنت تعرف ارتفاع الكرة، فإنك تعلم جزءاً فقط من موقعها؛ مازلت تحتاج لمعرفة أين تقع بالنسبة لشمالك أو يمينك أو أمامك أو خلفك. في الحقيقة، يمكنك تحديد موقعها بالكامل (أو أي كمية متجهة أخرى) بدلالة ثلاث مركبات على طول ثلاثة اتجاهات متعامدة (أو بزاوية قائمة) على بعضها البعض. هذا يعني أنه يمكنك وصف موقع الكرة بصورة كاملة من خلال ارتفاعها الرأسي، ومسافتها الأفقية عن يمينك أو شمالك، ومسافتها الأفقية أمامك أو خلفك. فمثلا، يمكن أن تكون الكرة فوقك بـ 10m و 3m عن شمالك، و 2m خلفك. هذه المسافات الثلاثة تحدد بدقة موقع الكرة.

حتى الآن، نحن في الحقيقة لم ندرس سوى المركبات الرأسية للموقع، والسرعة، والتسارع. ولكننا الآن سنجعل الكرة تتحرك أفقيا فعلينا أيضاً أن نأخذ في الاعتبار ماذا يحدث للمركبتين الأفقيتين لكل من هذه الكميات المتجهة. إن متابعة كل الثلاث مركبات لكل كمية صعبة. وطالما نحن مهتمون بحركة كرة مقذوفة؛ فإننا يمكننا إلغاء المركبات في الاتجاه يمين-شمال بقذف الكرة للأمام. بهذه الطريقة ستتحرك الكرة فقط في مستوى أفقي يمتد مباشرة أمامنا. عندها يمكننا تحديد موقع الكرة بدلالة ارتفاعها ومسافتها الأفقية أمامنا.

ولأن تسارع كرة في حالة سقوط هو مقدار ثابت ومستقل عن موقع الكرة قرب سطح الأرض، فإن حركتها الأفقية لا تعتمد على حركتها الرأسية. ونحن نعرف سابقا عن حركة الكرة الرأسية، ولكن ما هي حركتها الأفقية؟ يبدو أننا نحتاج إلى علاقات جديدة لوصف تغير المركبات الأفقية للموقع والسرعة والتسارع مع الزمن. من حسن الحظ، يمكننا إعادة استخدام المعادلات (٢,٢,١) و (٣,٢,١).

بالرغم من أن المعادلات (٢,٢,١) و (٣,٢,١) عُرّفت على أنها معادلات لوصف الحركة الرأسية لكرة، ولكنها في الحقيقة أعم من ذلك. هذه المعادلات تربط ما بين ثلاث كميات متجهة – الموقع، والسرعة، والتسارع الثابت – مع بعضها البعض. فهي تصف كيف يتغير موقع جسم وسرعته مع الزمن عندما يخضع لتسارع ثابت، بغض النظر عن اتجاه هذا التسارع الثابت.

هذه المعادلات تنطبق أيضا على مركبات الموقع والسرعة والتسارع الثابت. فإذا وضعت عبارة «المركبة الرأسية لـ» أمام كل من الكميات المتجهة في المعادلتين (٢,٢,١) و (٣,٢,١)، فإن المعادلتين تصفان بشكل صحيح حركة الجسم الرأسية. ويمكن أن نقوم بالمثل لحركة الجسم الأفقية. فنظرتنا السابقة للحركة الرأسية أدخلت ضمنيا عبارة «المركبة الرأسية لـ» في المعادلتين. سوف نقوم



شكل ٤,٢,١ : حتى وإن كانت الكرة لها سرعة ليست رأسية تماما ولا أفقية تماما، فإن سرعتها مع هذا يمكن أن تُرى على أن لها مركبة رأسية ومركبة أفقية. إن جزءاً من سرعتها الكلية يعمل على تحريك الكرة للأعلى، والجزء الآخر يعمل على تحريكها أفقيا.

الآن بإدخال عبارة «المركبة الأفقية لـ» لفهم الحركة الأفقية لكرة مقذوفة.

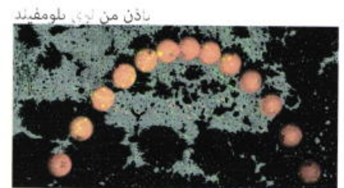
بمجرد أن تغادر الكرة يدك، فإنه يمكن تفكيك حركتها إلى جزئين: حركة رأسية وحركة أفقية (شكل ٤,٢,١). جزء من سرعة الكرة الابتدائية في الاتجاه الأعلى، ومركبة هذه السرعة الرأسية هي التي تحدد ارتفاع وهبوط الجسم. وجزء من هذه السرعة الابتدائية في الاتجاه الأفقي أو المدى الأمامي، ومركبة هذه السرعة الأفقية هي التي تحدد اندفاع الكرة في المدى الأمامي.

بما أن الجاذبية هي القوة الوحيدة المؤثرة على الكرة وتأثيرها فقط في الاتجاه الرأسي للأسفل، فإنه لا توجد أي مركبة أفقية للتسارع. لذا فإن المركبة الأفقية للسرعة تظل ثابتة، وبالتالي ستتحرك الكرة في المدى الأمامي بمعدل ثابت طوال رحلتها (شكل ٥,٢,١). فإجمالاً، المركبة الرأسية للأعلى للسرعة الابتدائية للكرة تحدد مقدار الارتفاع الذي تصل إليه الكرة والزمن الذي تبقى فيه معلقة قبل أن تصطدم بالأرض، بينما المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية تحدد سرعة حركة الكرة في المدى الأمامي خلال زمن تحليقها في الهواء (شكل ٦,٢,١).

عندما تصطدم الكرة بالأرض، فإنها ما تزال لها مركبة السرعة الأفقية الأصلية، ولكن مركبة سرعتها الرأسية تتجه في هذه اللحظة إلى الأسفل. إن السرعة الكلية للكرة تتكون من هاتين المركبتين، فتبدأ الكرة بسرعة متجهة للأعلى والأمام وتنتهي بسرعة متجهة للأسفل والأمام.

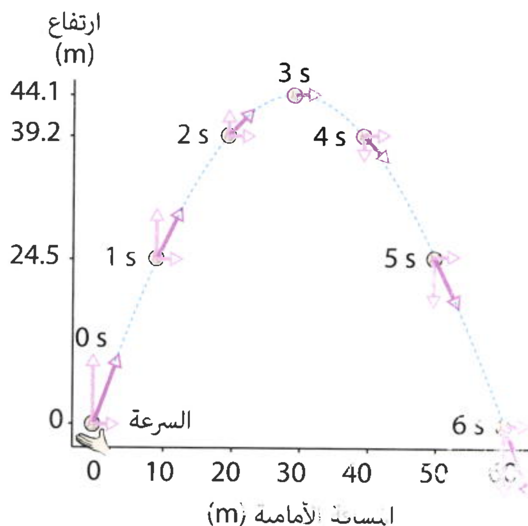
إذا أردت لكرة أو طلقة أن تصطدم بالأرض على أكبر بعد ممكن عن قدميك، فإنه يجب عليك أن تبقيها محلقة لزمن طويل وأن تعطيها سرعة أفقية كبيرة جدا. بمعنى آخر، يجب أن تتوصل لتوازن جيد بين مركبتي السرعة الرأسية والأفقية (شكل ٧,٢,١).

تحدد هاتان المركبتان للسرعة سوية طريق تحليق الكرة، أي مسار المقذوفة. إذا قذفت الكرة رأسيا للأعلى، فإنها ستظل محلقة لوقت طويل ولكنها لن تتحرك أبداً للأمام (وستحتاج لارتداء خوذة). وإذا قذفت الكرة إلى الأمام مباشرة، سيكون لديها سرعة ابتدائية أفقية كبيرة ولكنها ستصطدم بالأرض بشكل فوري تقريباً.



شكل ٥,٢,١ : كرة الغولف تنتقل تدريجيا لليمين بعد أن تم قذفها لأن الجاذبية تؤثر على مركبة سرعة الكرة الرأسية فقط.

بإهمال كل من مقاومة الهواء والفرق في الارتفاع بين ذراعك التي تقذف بها ومستوى الأرض الذي ستصطدم به الكرة في نهاية المطاف، فإن خيارك الأفضل هو أن ترمي الكرة بزاوية مقدارها 45° فوق المستوى الأفقي. عند هذه الزاوية ستكون مركبة السرعة الابتدائية المتجهة للأعلى مساوية لمركبة السرعة الابتدائية المتجهة للأمام. في هذه الحالة فإن الكرة ستظل محلقة في الهواء لوقت طويل نوعا ما وستُحسن الكرة استعمال هذا الوقت في التحرك للأمام. الزوايا الأخرى لن تحسن استخدام السرعة الابتدائية لتحريك الكرة للأمام. (يتضمن

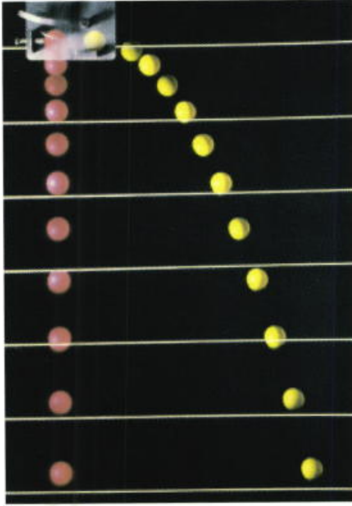


شكل ٦,٢,١: عندما تقذف كرة للأعلى بزاوية معينة فإن جزءاً من السرعة الابتدائية ستكون في الاتجاه الرأسي وجزء في الاتجاه الأفقي. هذه الحركات الرأسية والأفقية تحدث بشكل مستقل عن بعضها البعض. فالكرة ستصعد وتهبط كما فعلت في الأشكال (٢,٢,١) و (٣,٢,١) ، وفي الوقت ذاته ستتحرك إلى الأمام. وحيث أنه لا توجد مركبة أفقية للتسارع (فالجاذبية تؤثر فقط في الاتجاه الرأسي)، فإن السرعة في الاتجاه الأفقي تظل ثابتة كما هو موضح من خلال أسهم السرعة. في هذا المثال، تقطع الكرة مسافة 10m للأمام في كل ثانية وتصطدم بالأرض على بعد 60m من قدميك بعد تحليق في الهواء لمدة 6s.

الملحق أ مناقشة حول كيفية تحديد المركبات الأفقية والرأسية للسرعة).

هذه الأفكار ذاتها تنطبق على كرتي بيسبول، إحداهما تُسقط من مرتفع من السكون والأخرى تقذف أفقيا من نفس المرتفع. إذا غادرت كلا الكرتين يديك في نفس اللحظة فإنهما سيصطدمان بالأرض في الوقت نفسه (شكل ٨,٢,١). إن كون الكرة الثانية لها سرعة أفقية ابتدائية لن يؤثر على الزمن الذي ستأخذه للهبوط للأرض، وذلك لأن الحركات الأفقية والرأسية مستقلة عن بعضها البعض. بالطبع، الكرة التي قذفت أفقيا ستصطدم بالأرض بعيدا عن قاعدة المرتفع، بينما الكرة الأولى والتي سقطت من السكون ستهبط تحت موقع يدك مباشرة.

ريتشارد ميغنا / فاندمنتل للتصوير

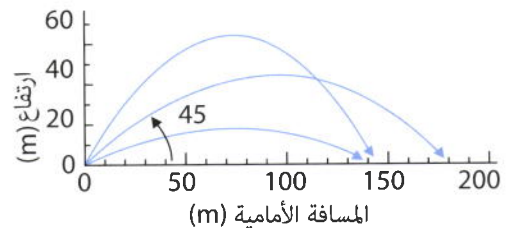


شكل ٨,٢,١: عندما أُسقطت هاتان الكرتان فإنهما تسارعتا إلى الأسفل بمعدل ثابت مقداره $9.8\,m/s^2$ وسرعتاهما تزايدت بشكل مطرد في الاتجاه الأسفل. على الرغم من أن إحداهما كانت في أول الأمر تتحرك إلى اليمين، ولكنهما هبطتا سويًا.

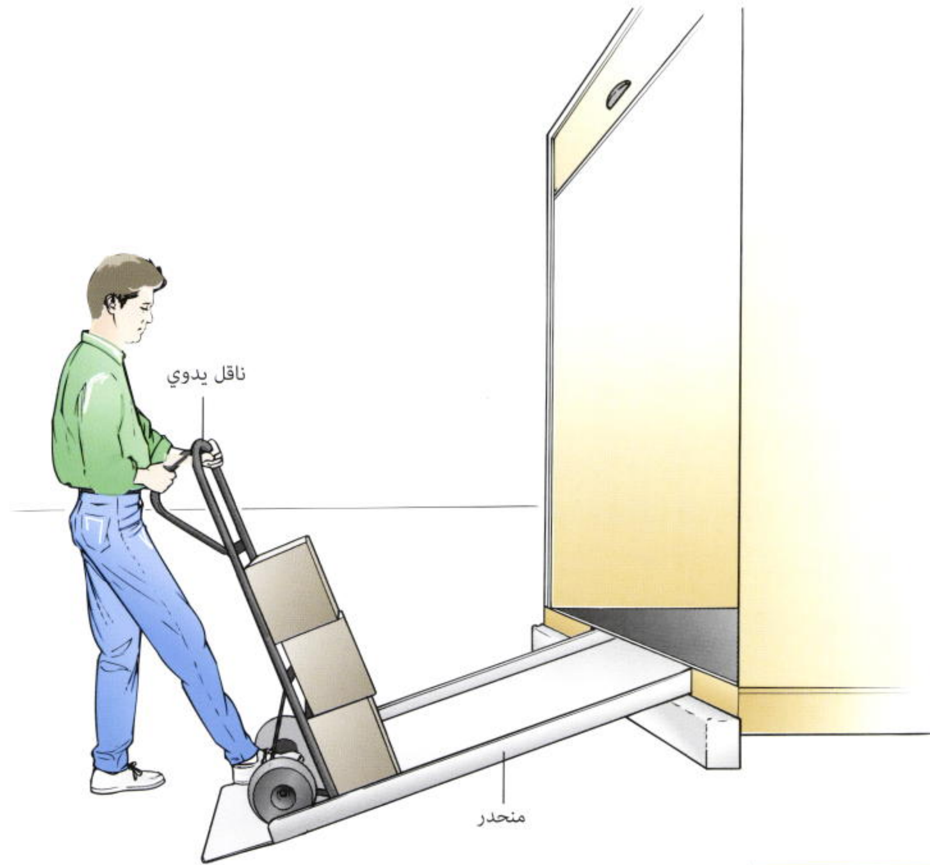
تحقق من فهمك # ٤: صوّب للأعلى

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

لماذا يجب على القنّاصة أو النبّالة التصويب فوق الهدف بقليل؟ لماذا لا يصوّب ببساطة على مركز الهدف مباشرة ليصيبه؟



شكل ٧,٢,١: إذا أردت أن تسقط الكرة إلى الأرض على أبعد مسافة ممكنة منك، بعد إعطائها سرعة ابتدائية معينة، فارْم الكرة بزاوية مقدارها "45 . القذف بهذه الزاوية، والتي تقع في منتصف زاويتي الاتجاه الأفقي والرأسي، يجعل للكرة مركبات أفقية ورأسية متساوية من السرعة الابتدائية. عندها ستمكث الكرة زمنا طويلاً نسبيا في الهواء وستُحسن استخدام زمن التحليق للتحرك في المدى الأمامي.



١-٣ المنحدرات

في القسم السابق، تعرفنا على ما يحدث لجسم يواجه قوة واحدة فقط: قوة الجاذبية للأسفل. ولكن ماذا يحدث لأجسام تتعرض لقوتين أو أكثر في نفس الوقت؟ تخيل، مثلاً، جسماً ساكنا على الأرض. هذا الجسم يؤثر عليه قوتان؛ قوة الجاذبية للأسفل وقوة دفع الأرض للأعلى. إذا كانت الأرض مستوية، فإن الجسم لن يتسارع؛ ولكن إذا كان السطح مائلا، أي يشكل منحدراً، فإن الجسم سيتسارع للأسفل. في هذا القسم، سندرس حركة الأجسام التي تسير فوق منحدرات. تسمى هذه المنحدرات أيضا الأسطح المائلة، وهي أدوات شائعة الاستخدام لجعل تحريك الأشياء أسهل.

أسئلة للتفكير

كيف يمكن لمنحدر أن يُمكّن شخصاً واحداً من رفع جسم ثقيل جدا؟ لماذا يكون إنزال جسم ثقيل أسهل بكثير من رفعه؟ ما الذي يتغير بالنسبة للجسم عندما تقوم برفعه؟ لماذا تكون الهضبة الشديدة الانحدار أكثر رهبة للتزلج منها للأسفل مقارنة بمنحدر ذي ميل أكثر تدرجا؟ لماذا يكون صعود هضبة شديدة الانحدار باستخدام دراجة أصعب بكثير؟

تجارب يمكن القيام بها

ضع كتابا فوق منضدة أو لوحة زلقة ومستوية. ثبت الكتاب لمدة ثانية ثم اتركه دون أن تقوم بدفعه. لماذا يظل الكتاب ساكنا؟

والآن جهّز نفسك بقلم رصاص. دع صديقاً يقوم بإمالة سطح الطاولة أو اللوح بعض الشيء لكي يبدأ الكتاب بالتزحلق للأسفل. هل تستطيع أن توقف الكتاب بدفعه بقلم الرصاص؟ أعد الكتاب مرة أخرى على الطاولة واجعل صديقك يقوم بإمالة السطح بحدّة أكبر. هل درجة الإمالة تؤثر على مقدرتك لإيقاف الكتاب من الانزلاق؟ والآن حاول أن تدفع الكتاب للأعلى باستخدام قلم الرصاص (أ) عندما يكون ميل سطح الطاولة طفيفا و(ب) عندما يكون ميله أكثر حدة. أي المهمتين

تتطلب قوة أكبر؟ لماذا؟

من الواضح أن دفعة بسيطة هي كل ما قد تحتاج إليه لرفع جسم ثقيل إذا استخدمت منحدراً لمساعدتك. لفهم لماذا هذا العمل البطولي ممكن، سنحتاج لدراسة حفنة من المفاهيم الفيزيائية وبضع من القوانين الأساسية للحركة.

بيانو على الرصيف

تخيّل أن لديك صديق عازف بيانو موهوب ولكن غير مكتشَف. استأجر صديقك شقة جديدة، ولأنه لا يستطيع تحمّل نفقات عمال نقل محترفين (شكل ١,٣,١)، طلب منك مساعدته في نقل البيانو الفخم الخاص به، ولحسن الحظ، فإن شقته الجديدة تقع في الطابق الثاني فقط. ولكنكما مازلتما تواجهان تحدياً صعباً: كيف توصلان هذا البيانو الثقيل إلى هناك؟ والأهم من ذلك، كيف يمكنكما منعه من السقوط عليكما أثناء نقله؟

بإذن من متجر جيري أولينغر للمواد السينمائية



شكل ١,٣,١: ستكون عملية النقل هذه أسهل باستخدام المنحدرات.

المشكلة هي أنك لا تستطيع أن تدفع البيانو للأعلى بقوة كافية لرفعه كله في مرة واحدة. بالطبع، أحد الحلول لهذه المشكلة هو كسر البيانو وجعله قطعاً وحمل هذه القطع للأعلى واحدة تلو الأخرى. ولكن لهذه الطريقة عقبات واضحة: صديقك لا يتوقع شحنة من الحطب. حل أفضل يكمن في إيجاد شيء آخر يساعدك في عملية الدفع للأعلى، وأحد أفضل خياراتك سيكون باستخدام آلة بسيطة تسمى المنحدر.

عبر الأزمان، جعلت المنحدرات - وتُعرف أيضاً بالأسطح المائلة - القيام بأعمال مثل تحريك البيانو ممكناً. فنظراً لقدرة المنحدرات على التأثير بالقوة الكبيرة للأعلى اللازمة لرفع الحجارة والحديد، كانت من أدوات البناء الأساسية منذ أيام بناء الأهرامات. لرؤية كيف يمكن للمنحدرات أن توفر هذه القوى الرافعة، سنواصل دراسة مثال البيانو بالنظر في بادئ الأمر للقوة التي تؤثر على البيانو عندما يلمس سطحاً. في الوقت الحالي، سنستمر في إهمال الاحتكاك ومقاومة الهواء لأنهما سيعقدان مناقشتنا دون أي ضرورة. إضافة لذلك وطالما البيانو يتحرك على عجلات، فإن الاحتكاك يمكن إهماله.

تحقق من فهمك #١ : العمل بالطوب (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

أيهما يتطلب قوى أكبر: رفع ركام من الطوب طوبة طوبة أم رفعها جميعاً مرة واحدة؟

دفع الرصيف المرتجع: قانون نيوتن الثالث

بينما يقف البيانو ساكناً على الرصيف خارج الشقة، فإنك تقوم باكتشاف مذهل: البيانو لا يسقط. هل اختفت الجاذبية؟ الإجابة على هذا السؤال ستكون واضحة لحد الألم إذا كانت قدمك تحت إحدى عجلات البيانو. لا، فوزن البيانو بأكمله ما زال موجوداً، ولكن هناك شيء ما يحدث عند سطح الرصيف لمنع البيانو من السقوط. دعنا نقوم بالنظر بدقة لهذا الوضع.

في بادئ الأمر، من الواضح أن البيانو يدفع الرصيف للأسفل بقوة. ولهذا أنت تبعد أصابع قدميك عنه. ولكن وجود قوة جديدة للأسفل مؤثرة على الرصيف لا يفسر لماذا لا يسقط البيانو. بدلا من ذلك، علينا النظر لرد فعل الرصيف لدفع البيانو للأسفل: فالرصيف يدفع البيانو للأعلى! يمكنك أن تشعر برد الفعل هذا بالانحناء باتجاه الرصيف ودفعه للأسفل بيدك - الرصيف سيدفعك للأعلى. هاتان القوتان، دفعك الرصيف للأسفل ودفعه ليدك للأعلى، متساويتان تماما في المقدار ولكنهما متضادتان في الاتجاه.

هذه الملاحظة، أن شيئين يؤثران على بعضهما البعض بقوتين متساويتين ومتضادتين، ليست خاصة بالرصيف أو البيانو أو يديك؛ ولكنها في الحقيقة دائماً صحيحة. فإنك إذا قمت بدفع أي جسم فإن هذا الجسم سيدفعك بقوة مساوية لقوتك باتجاه معاكس تماما. هذا القانون - والذي في الغالب يعبر عنه بالنص «لكل فعل يوجد رد فعل مساوٍ لكن معاكس» - يعرف بقانون نيوتن الثالث للحركة، وهو آخر قوانينه الثلاثة.

قانون نيوتن الثالث للحركة
لكل قوة يؤثر بها جسم على جسم آخر، فإنه توجد قوة أخرى مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه يؤثر بها الجسم الآخر على الجسم الأول.

إن شمولية هذا القانون مدهشة. فسواء كان الجسم كبيراً أو صغيراً، قاسياً أو ليناً، ساكناً أو أسرع من صاروخ، فإنك إذا تمكنت من دفعه بقوة فإنه سيدفعك بقوة مساوية ولكن في عكس الاتجاه.

في مثالنا الحالي، فإن الرصيف والبيانو يدفعان بعضهما البعض بقوى متساوية ولكنها متعاكسة الاتجاه. من هذا الزوج من القوى المتساوية ولكن متعاكسة، يوجد قوة واحدة فقط تؤثر على البيانو: هي قوة دفع الرصيف للأعلى. هذه القوة المؤثرة على البيانو والدافعة له للأعلى هي التي تمنع البيانو من السقوط. لقد قمنا بحل هذا اللغز.

تنشيط الحدس: الفعل ورد الفعل

الحدس يقول أنه عندما تدفع جسماً يتحرك بعيداً عنك فإن هذا الجسم يدفعك بقوة أقل من القوة التي تدفعه بها. وعندما تدفع جسماً يتحرك باتجاهك فإنه يدفعك بقوة أكبر من القوة التي دفعته بها.

الفيزياء تقول بأنك عندما تدفع جسماً، فإن الجسم سيدفعك دائما بنفس مقدار القوة تماماً التي تدفعه بها.

القرار: من الصعب أن تقوم بدفع جسم يتحرك بعيدا عنك، لذا فإنه من الطبيعي أن تدفعه بقوة أقل مما تتوقع. القوة القليلة التي يدفعك بها الجسم هي ببساطة رد فعل مساوٍ في المقدار ومعاكس في الاتجاه للقوة القليلة التي قمت أنت ببذلها على الجسم. على العكس من ذلك، إنه من الصعب أن لا تدفع جسماً يتحرك باتجاهك بقوة، لذا فإنه من الطبيعي أن تدفعه بقوة أكبر مما تتوقع. القوة الكبيرة التي يدفعك بها الجسم هي، مرة أخرى، رد فعل مساوٍ في المقدار ومعاكس في الاتجاه للقوة الكبيرة التي قمت أنت ببذلها على الجسم.

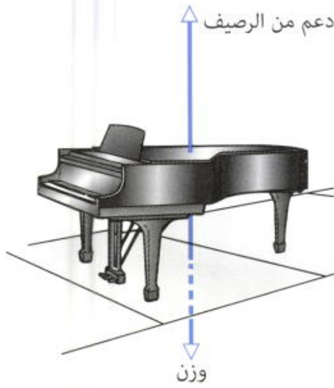
خلاصة قوانين نيوتن للحركة
الجسم غير الخاضع لأي قوة خارجية سيتحرك بسرعة ثابتة، فيقطع مسافات متساوية في أزمنة متساوية متبعاً مسار خط مستقيم.
القوة التي تؤثر على جسم تساوي حاصل ضرب كتلة ذلك الجسم بتسارعه واتجاه التسارع هو نفسه اتجاه القوة.
لكل قوة يؤثر بها جسم على جسم آخر، فإنه توجد قوة أخرى مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه يؤثر بها الجسم الآخر على الجسم الأول.

البحث عن الدعم وجمع القوى

بالرغم من فهمنا الآن لماذا لا يسقط البيانو، إلا أننا مازلنا لا نعلم ما هو نوع القوة التي يستخدمها الرصيف لدفع البيانو للأعلى، ولماذا هذه القوة الدافعة للأعلى متوازنة تماما مع وزن البيانو الدافع للأسفل.

دعنا نبدأ بنوع القوة: بما أنه لا يستطيع جسمان أن يحتلا نفس الموقع في نفس اللحظة، فإن أسطحهما تقوم بدفعهما بعيدا عن بعض كلما تلامسا. فالجسمان يبذلان قوى داعمة لبعضهما البعض، حيث يدفع أحدهما الآخر بقوة متجهة

مباشرة بعيدا عن سطحه – أي في الاتجاه العمودي لسطحه (انظر ٥). بما أن الرصيف أفقي، فإن القوة الداعمة التي يبذلها تكون رأسية – إلى الأعلى مباشرة (شكل ٢,٣,١).



شكل ٢,٣,١: بيانو في حالة سكون على الرصيف. يبذل الرصيف قوة داعمة متجهة إلى الأعلى توازن بالضبط وزن البيانو المتجه إلى الأسفل. محصلة القوة على البيانو تساوي صفراً، فبالتالي لا يتسارع.

ولكن ما هو حجم تلك القوة الداعمة؟ للإجابة على هذا السؤال، افترض أن قوة الرصيف الداعمة كبيرة بمقدار يكفي لجعل البيانو يتسارع إلى الأعلى. عما قريب سيُقلع البيانو من الرصيف، وبما أن سطح البيانو والرصيف لم يعودا متلامسين، فإن قوة الرصيف الداعمة للبيانو ستضعف. بدلا من ذلك، افترض أن قوة الرصيف الداعمة صغيرة بمقدار كافٍ لجعل البيانو يتسارع إلى الأسفل. عما قريب سيبدأ البيانو باختراق الرصيف، ومع تزايد تداخل سطحي البيانو والرصيف فإن قوة الرصيف الداعمة للبيانو ستزداد قوة.

بسبب هذه السلوكيات، فإن قوة الرصيف الداعمة للبيانو للأعلى تعدّل نفسها تلقائيا إلى أن توازن تماماً وزن البيانو للأسفل فلا يتسارع البيانو للأعلى ولا للأسفل. وعندما تجلس فوق البيانو وقت الاستراحة، فإن قوة الرصيف الداعمة للأعلى تعيد ضبط نفسها لتوازن وزنك أيضا.

طريقة أخرى لصياغة مفهوم أن القوة الداعمة المبذولة للأعلى على البيانو توازن تماما وزن البيانو للأسفل هي أن نقول أن محصلة القوة على البيانو تساوي صفراً، والتي تعني أن مجموع كل القوى المؤثرة على البيانو هو صفر. في الغالب تتعرض الأجسام لأكثر من قوة في الوقت الواحد، وإن محصلة القوى إضافة إلى كتلة الجسم هي التي تحدد كيفية تسارعه. عندما تقوم أنت وصديقك بدفع البيانو في نفس الاتجاه، فإن قواكما تجتمع وتدعم بعضها البعض حتى تجعل البيانو يتسارع في ذاك الاتجاه (شكل ٣,٣,١ أ). وعندما تقومان بدفع البيانو في اتجاهين معاكسين، فإن قواكما تتعارض وتلغي بعضها البعض، على الأقل بشكل جزئي (شكل ٣,٣,١ ب).

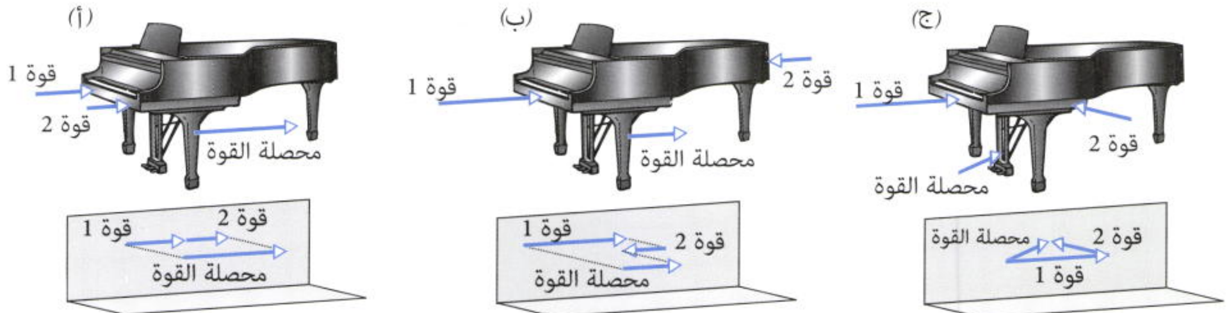
وعندما تدفعان البيانو بزاوية معينة محصورة بين اتجاهي دفعكما، فإن محصلة القوة ستشير لاتجاه بين اتجاهيكما. على سبيل المثال، إذا دفعت البيانو باتجاه الشرق بينما دفعه صديقك باتجاه الشمال، فإن محصلة القوة ستشير باتجاه الشمال الشرقي والبيانو سيتسارع في ذلك الاتجاه (شكل ٣,٣,١ ج). إن الزاوية الدقيقة لمحصلة القوة وما يلحقه من تسارع البيانو يعتمد بالتحديد على مقدار قوة دفع كل شخص. في معظم النقاشات القادمة، سنحتاج فقط إلى تقدير أوّلي لمقدار واتجاه محصلة القوة، وسنحصل على هذا التقدير باستخدام المنطق السليم.

٥ تسمى القوى التي تتجه بعيدا عن السطح تماما بالقوى العمودية، لأن المصطلح عمودي يستخدم من قبل الرياضيين لوصف شيء يتجه بعيدا عن السطح - بزاوية قائمة أو عمودية لذلك السطح.

في ما عدا الاتجاه، هناك اختلاف واحد مهم بين القوة التي تبذلها الجاذبية على البيانو والقوة الداعمة التي يبذلها الرصيف عليه. فبينما يكون وزن البيانو موزعاً في كافة أجزائه، فإن قوة الرصيف الداعمة للأعلى تؤثر فقط على عجلات البيانو. فحتى وإن كانت محصلة القوة على البيانو صفراً، فإن وجود قوى تؤثر عليه في مواقع متعددة قد يؤدي إلى إجهاد كبير داخل البيانو. فإذا لم يصنع البيانو صنعاً جيداً، فمن الممكن أن يفقد البيانو ساقاً أو ساقين أثناء نقله.

تحقق من فهمك # ٣: ركوب المصعد (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

بينما تركب المصعد وتتحرك للأعلى بسرعة ثابتة، ما هي القوتان اللتان تؤثران عليك؟ وما هي محصلة القوة عليك؟



شكل ٣,٣,١ : عندما تؤثر عدة قوى على جسم بشكل آني، فإن الجسم يستجيب لمجموع هذه القوى. هذا المجموع يسمى محصلة القوة، وله مقدار واتجاه. في هذا الشكل، وأيضا في كل موضع في هذا الكتاب، يشير طول كل سهم قوة لمقدارها. يمكنك جمع القوى بيانياً بترتيب أسهم القوى بالتسلسل، فيكون رأس السهم متصلاً بذيل الذي يليه. عندها سيشير سهم محصلة القوة في اتجاه الخط الواصل بين ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير. بعض من أسهم القوى موضحة في الشكل مزاحة بشكل طفيف للتوضيح، إزاحة لا تؤثر على عملية الجمع.

معتقدات خاطئة شائعة: قانون نيوتن الثالث والقوى المتوازنة

المعتقد الخاطئ:

عندما تدفع جسماً ما وهو يدفعك بقوة مساوية ومتعاكسة، فإن هاتين القوتين توازن بعضهما البعض تماما فلا يتسارع شيء!

القرار:

بينما يدفعك جسم ما بنفس قوة دفعك له، فإن هاتين القوتين تؤثران على جسمين مختلفين ولا تستطيعان موازنة بعضهما البعض. الجسم الذي تدفعه يتأثر بقوة دفعك فقط ويتسارع تبعاً لذلك.

الذي يحتاجه البيانو: طاقة

بينما تقترب من مهمة رفع بيانو صديقك لشقته، قد تبدأ بالقلق حول موضوع السلامة. فبالتأكيد هناك فرق بين وجود البيانو في حالة سكون على الرصيف وبين وجوده معلقا على لوح خارج شقة الطابق الثاني. فأيهما تفضل أن تجلس تحته؟ فالبيانو المعلق لديه شيء ما ليس لدى البيانو الذي على الرصيف: المقدرة على إحداث حركة وإعادة ترتيب الهيكلة (أي تلف) في ذاته والأشياء تحته. هذه المقدرة لجعل الأشياء تحدث تسمى طاقة، وعملية جعلها تحدث تسمى شغلاً.

الطاقة والشغل كميتان فيزيائيتان مهمتان، بمعنى أنهما قابلتان للقياس. على سبيل المثال، يمكنك قياس الطاقة الموجودة في البيانو المعلق، وكمية الشغل الذي سيبذله البيانو عندما يتحطم اللوح ويسقط هو على الرصيف. كما قد تتوقع، فإن المعنى الفيزيائي للطاقة والشغل يختلف بعض الشيء عن المعنى اللغوي. فالطاقة الفيزيائية ليست هي حيوية طفل في الملاهي أو محتوى كوب كبير من القهوة؛ بدلاً من ذلك، تُعرّف الطاقة بأنها المقدرة على إحداث شغل. بالمثل، فإن الشغل الفيزيائي لا يشير إلى النشاطات التي تحدث في المكتب أو الحديقة؛ بدلاً من ذلك، هو يشير لعملية تحويل الطاقة.

فالطاقة هي التي تتحول، والشغل هو الذي يقوم بعملية التحويل. إن الخاصية الأكثر أهمية للطاقة هي أنها محفوظة. في الفيزياء، الكمية المحفوظة هي الكمية التي لا يمكن أن تُكوَّن أو تُفنى ولكن يمكنها أن تنتقل بين الأجسام، وفي حالة الطاقة تتحول من شكل لآخر. الكميات المحفوظة هي كميات متميزة في الفيزياء؛ هناك عدد قليل منها. الجسم الذي يحتوي على طاقة لا يمكنه أن يجعل هذه الطاقة تختفي ببساطة ولكنه فقط يستطيع التخلص منها بإعطائها لجسم آخر، ويحدث هذا الانتقال عن طريق شغل يُبذل على ذلك الجسم.

العلاقة بين الطاقة والشغل مشابهة للعلاقة بين المال والإنفاق: فالمال هو الذي ينتقل، والإنفاق هو الذي يقوم بعملية النقل. المواطنون العقلاء والمطيعون للقانون لا يقومون بإنتاج أو إتلاف المال؛ لكنهم يقومون بنقله بين أنفسهم عن طريق الإنفاق. وكما أن السمة المثيرة للمال هي إنفاقه، فإن السمة المثيرة للطاقة هي القيام بشغل باستخدامها. يمكننا تعريف المال على أنه المقدرة على الإنفاق، مثل ما يمكننا تعريف الطاقة على أنها المقدرة على القيام بشغل.

إلى الآن نحن نستعمل تعريفاً حلقياً: الشغل هو انتقال الطاقة والطاقة هي المقدرة على القيام بشغل. ولكن ما هو المتطلب لعمل شغل على جسم؟ المتطلب هو أن تقوم بشغل على جسم بتأثير قوة عليه بينما هو يتحرك باتجاه هذه القوة. فعندما تقذف كرة، بتأثير قوة للأمام على الكرة تدفعها وتحركها إلى الأمام، فأنت تقوم بشغل على الكرة. أيضا عندما ترفع حجراً، بدفع وتحريك الحجر للأعلى، فأنت تبذل شغلاً على الحجر. في كلا الحالتين، أنت تنقل طاقة من جسمك لجسم آخر عن طريق القيام بشغل عليه.

هذه الطاقة المنقولة كثيراً ما تكون ظاهرة في الجسم. عندما تقذف كرة، فإنها تكتسب سرعة وتخضع لزيادة في طاقتها الحركية- أي الطاقة الناتجة من الحركة والتي تمكّن الكرة من القيام بشغل على أي شيء تصطدم به. وعندما ترفع حجراً، فإنه يرتفع أكثر وأكثر عن الأرض ويخضع لزيادة في طاقة الجذب الكامنة - الطاقة المختزنة في قوى الجاذبية بين الحجر والأرض والتي تمكّن الحجر من القيام بشغل على أي شيء يسقط عليه. بصفة عامة، الطاقة الكامنة هي الطاقة المختزنة في القوى بين أو ضمن الأجسام.

عودة للمهمة التي بين أيدينا، من الواضح الآن أن رفع البيانو لشقة الطابق الثاني سيزيد من طاقة الجذب الكامنة للبيانو. وبما أن الطاقة كمية محفوظة، فإن هذه الطاقة المضافة يجب أن تأتي من مصدر آخر. للأسف، هذا المصدر الآخر هو أنت! لإيصال البيانو، سيتحتم عليك أن توفر له طاقة الجذب الكامنة التي يحتاجها عن طريق القيام بكمية شغل عليه مساوية لهذه الطاقة. وكما سنرى، يمكنك القيام بهذا الشغل بالطريقة المتعبة، وذلك بحمله ورفعه عن طريق سلم أو بالطريقة السهلة بدفعه للأعلى باستخدام منحدر.

تحقق من فهمك # ٤: لا نقص في الطاقة (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

هل لأي من الأجسام التالية طاقة يمكن أن تستغني عنها: زنبرك مضغوط، بالون منفوخ، أصبع من الديناميت، وكرة ساقطة؟

رفع البيانو: القيام بشغل

للقيام بشغل على جسم ما، يجب عليك أن تدفعه أثناء تحركه في اتجاه دفعك. الشغل الذي تبذله عليه هو حاصل ضرب القوة التي تبذلها عليه في المسافة التي يقطعها في اتجاه قوتك. يمكننا أن نعبر عن هذه العلاقة بالمعادلة اللفظية:

الشغل = القوة × المسافة (١،٣،١)

ورمزيا:

$$W = F \cdot d$$

وفي لغة الحياة اليومية: إذا لم تكن تدفع أو لا شيء يتحرك، فأنت لم تقم بشغل.

يمكنك ببساطة حساب الشغل الذي تبذله إذا تحرك الجسم في نفس اتجاه قوة دفعك: فقط قم بضرب القوة التي بذلتها بالمسافة التي قطعها الجسم. ولكن إذا لم يتحرك الجسم في اتجاه قوة دفعك، فعليك أن تقوم بضرب قوة دفعك في مركبة حركة الجسم في اتجاه قوة دفعك.

طالما أن الزاوية المحصورة بين اتجاه قوتك واتجاه حركة الجسم صغيرة، فكثيراً ما يمكنك إهمال هذا التعقيد. ولكن عندما تكبر الزاوية، فإن الشغل الذي تقوم به على الجسم يقل. عندما يتحرك الجسم بزاوية عمودية بالنسبة لقوة دفعك، فإن الشغل الذي تقوم به على الجسم يتقلص إلى الصفر - أي إنه لا يتحرك على الإطلاق في اتجاه قوتك المبذولة. وعند الزوايا الأكبر من 90° ، فالجسم يتحرك في اتجاه معاكس لاتجاه قوتك والشغل الذي تبذله عليه يصبح في الحقيقة شغلاً سالبا!

من تذكرنا أن القوى تأتي دائما على هيئة زوجين متساويين في المقدار ومتعاكسين في الاتجاه، فإنه يمكننا الآن تفسير لماذا الطاقة محفوظة: عندما تقوم بشغل على جسم ما، فإن الجسم يقوم آنيا بشغل مساوٍ وسالب عليك! فإذا دفعت جسماً ما وتحرك باتجاه قوتك، فإن الجسم يدفعك للخلف وتتحرك باتجاه معاكس لقوته. أنت تقوم بشغل موجب على الجسم والجسم يقوم

بشغل سالب عليك.

فمثلا، عندما ترفع البيانو لتقدير وزنه، فأنت تدفعه للأعلى وهو يتحرك أيضا للأعلى، وبالتالي أنت تقوم بشغل عليه. في نفس الوقت، البيانو يدفع يديك إلى الأسفل ولكن يديك تتحرك للأعلى، بالتالي يقوم بشغل سالب على يديك. بصفة عامة، طاقة البيانو تزيد بنفس المقدار الناقص من طاقتك - تحوّل مثالي! معظم الطاقة التي تفقدها هي طاقة الطعام، وهي نوع من الطاقة الكيميائية الكامنة، ومعظم الطاقة التي يكتسبها البيانو هي طاقة الجذب الكامنة.

عندما تُنزل البيانو بعد أن تدرك أنه ثقيل جدا ولا يمكن الصعود به بالسلم، فإن العملية تنعكس ويقوم البيانو بإرجاع الطاقة إليك. الآن يقوم البيانو بشغل عليك وأنت تقوم بشغل مساوٍ وسالب على البيانو. معظم الطاقة التي يفقدها البيانو هي طاقة الجذب الكامنة ومعظم الطاقة التي تكتسبها هي طاقة حرارية - نوع غير مرتّب من الطاقة والتي سنتناولها في القسم ٢-٢. جسمك ليس ماهراً في تخزين الشغل المبذول عليه، فتزداد حرارته ببساطة. مع ذلك، في الغالب يكون من الأسهل أن يُبذل شغل عليك من أن تبذل أنت شغلاً على شيء آخر. لهذا يكون إنزال الأجسام أسهل من رفعها.

أخيرا، عندما تمسك البيانو وهو في حالة سكون فوق الرصيف، ريثما يقوم صديقك بإعادة تركيب العجلة التي سقطت، فإنك والبيانو لا تقومان ببذل شغل على بعضكما البعض. ببساطة أنت تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية الكامنة من آخر وجبة طعام لك إلى طاقة حرارية في عضلاتك وبالتالي تزداد حرارتك، بأكثر من طريقة على الأرجح.

الكمية المحفوظة: الطاقة — منقولة عن طريق: الشغل

الطاقة: المقدرة على القيام بشغل. الطاقة ليس لها اتجاه. ويمكن أن تكون مخفية على شكل طاقة كامنة.

الطاقة الحركية: شكل الطاقة المحتواة في حركة الجسم.

الطاقة الكامنة: شكل الطاقة المختزنة في القوى بين أو ضمن الأجسام.

الشغل: الوسيلة الميكانيكية لنقل الطاقة؛ الشغل = القوة · المسافة

تحقق من فهمك # ٥ : القذف (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

عندما ترمي كرة بيسبول بشكل أفقي، فأنت لا تقوم بدفع ضد الجاذبية. فهل أنت تقوم بأي شغل على كرة البيسبول؟

دقق في أرقامك # ١: الشغل الخفيف، والشغل الثقيل (للإجابة، انظر صفحة ٣٣)

أنت تقوم بنقل كتب لرف جديد أعلى من الرف القديم بمسافة 1.20m (3.94ft). يزن الكتاب الواحد 10.0N (2.25lbf) وأنت لديك 10 من هذه الكتب ستنقلها. ما هو مقدار الشغل الذي يجب أن تقوم به على الكتب وأنت تنقلها؟ هل يهم عدد الكتب التي تنقلها في المرة الواحدة؟

طاقة الجذب الكامنة

ما هو مقدار الشغل الذي ستبذله على البيانو إذا قمت برفعه للأعلى باستخدام السلم لتوصله للشقة؟ باستثناء الدفعة القليلة الإضافية لبدء البيانو بالتحرك للأعلى، فإن حمل البيانو سيستلزم تحمّل وزن البيانو بينما يتحرك للأعلى من الرصيف إلى الطابق الثاني بسرعة ثابتة. بما أنك ستقوم بدفع البيانو للأعلى بقوة مساوية في المقدار لوزنه، فإن الشغل الذي ستقوم ببذله عليه سيكون حاصل ضرب وزن البيانو في المسافة التي قمت برفعه إليها.

حينما يرتفع البيانو وفق هذه الطريقة، فإن طاقة جذبه الكامنة تزداد بمقدار مساوٍ للشغل الذي تبذله عليه. فإذا اتفقنا أن البيانو له طاقة جذب كامنة مساوية للصفر عندما يكون ساكنا على الرصيف، فإن طاقة الجذب الكامنة للبيانو وهو معلق هي ببساطة وزنه مضروبا بارتفاعه فوق مستوى الرصيف. وبما أن وزن البيانو يساوي كتلته مضروبة بالتسارع بسبب الجاذبية، فإن طاقة جذبه الكامنة هي كتلته مضروبة في التسارع بسبب الجاذبية مضروبا بارتفاعه فوق مستوى

الرصيف.

هذه الأفكار ليست محصورة على البيانو، فيمكنك تحديد طاقة الجذب الكامنة لأي جسم بضرب كتلته في التسارع بسبب الجاذبية في ارتفاعه فوق المستوى الذي كانت طاقة جذبه الكامنة عنده مساوية للصفر. هذه العلاقة يمكن أن نعبر عنها بالمعادلة اللفظية:

طاقة الجذب الكامنة = الكتلة × التسارع بسبب الجاذبية × الارتفاع (٢,٣,١)

ورمزيا:

$$U = m \cdot g \cdot h$$

وفي لغة العامة: كلما ارتفعت الأجسام أكثر، كان ارتطامها أشد.

بالطبع، إذا كنت تعرف وزن الجسم، فيمكنك أن تستعمله بدلا من حاصل ضرب كتلة الجسم في تسارعه بسبب الجاذبية.

إذن ما هي طاقة الجذب الكامنة للبيانو عندما يصل للطابق الثاني؟ إذا كان وزنه 2000N (450lbf) والطابق الثاني يرتفع عن الرصيف بمسافة 5m (16ft)، فيكون قد قمت بمقدار10,000N·m (7200ft.lbf) من الشغل لرفعه إلى هناك، وبالتالي فإن طاقة الجذب الكامنة للبيانو ستكون 10,000N·m. وحدة النيوتن-متر هي وحدة النظام العالمي للطاقة والشغل؛ ولأهميتها فإن لها اسمها الخاص بها، وهو الجول (واختصارا J). عند الطابق الثاني، طاقة الجذب الكامنة للبيانو تساوي 10,000J.

باستعراض بعض الأمثلة من الحياة اليومية ستتمكن من تلمس مقدار طاقة الجول الواحد. رفع قنينة من الماء سعتها لتر واحد للأعلى لمسافة مقدارها 10cm (4inch) تتطلب شغلاً مقداره حوالي 1J. لكي يعمل مصباح قدرته مقدارها 100W فإنه يحتاج 100J من الطاقة في كل ثانية. وإن جسمك يستطيع أن يستخلص طاقة مقدارها 2,000,000J من شريحة واحدة من فطيرة الكرز. عندما تركب دراجة أو تقوم بالتجديف بشدة، فإن جسمك يستطيع أن يقوم بشغل مقداره 1000J كل ثانية. وبطارية المصباح الكهربائي المعتادة لديها حوالي 10,000J من الطاقة المختزنة.

الكمية	وحدة النظام العالمي *SI*	وحدة النظام البريطاني	*SI* ← النظام البريطاني	النظام البريطاني ← *SI*
الطاقة	الجول (J) (1N.m = 1J)	قدم.باوند (ft.lbf)	0.73757ft.lbf =1J	1.3558ft.lbf= 1J

تحقق من فهمك # ٦: ركوب الدراجات الجبلية (للإجابة ، انظر صفحة ٣٢)

الصعود بالدراجة لقمة جبل أصعب بكثير من التدحرج بها رجوعاً إلى قاعه. في أي موضع يكون لك أقصى طاقة جذب كامنة؟

دقق في أرقامك #٢ : يا مَن بالأسفل انتبهوا! (للإجابة، انظر صفحة ٣٣)

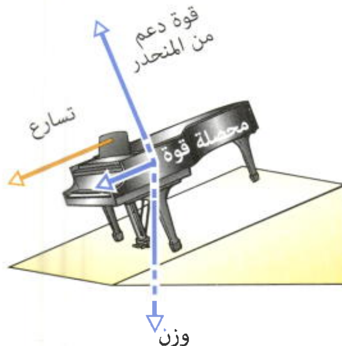
إذا حملت عملة بنس أمريكي (0.0025kg) لقمة مبنى الأمباير ستيت (ناطحة سحاب في مدينة نيويورك الأمريكية) (443.2m أو 1453.7ft) ، ما هو مقدار طاقة الجذب الكامنة التي ستمتلكها العملة؟

رفع البيانو باستخدام منحدر

من المؤسف أنك غالباً لن تتمكن وحدك من حمل البيانو للأعلى باستخدام السلم. أنت تحتاج إلى منحدر، لمساعدتك في كلٍ من تدعيم البيانو وتسهيل عملية رفعك للبيانو للطابق الثاني.

مثل الرصيف، يبذل المنحدر قوة داعمة على البيانو ليمنعه من اختراق سطحه. ولكن لأن المنحدر ليس أفقيا تماما، فإن تلك القوة الداعمة ليست رأسية تماما (شكل ٤,٣,١). وزن البيانو مازال متجهاً للأسفل، ولكن لأن قوة دعم المنحدر لا تتجه رأسياً للأعلى، فإن هاتين القوتين لا تستطيعان موازنة بعضهما البعض. أي هناك محصلة قوة لا صفرية على البيانو.

محصلة القوة هذه لا يمكنها أن تشير إلى داخل أو خارج المنحدر، لأنها إذا أشارت لأي من هذين الاتجاهين فإن البيانو سيتسارع إلى داخل أو خارج المنحدر، وعندها فإن الجسمين إما أن يفقدا تلامسهما أو يتحركا



شكل ٤,٣,١ : ينزلق بيانو من على سطح منحدر أملس (عديم الاحتكاك) تحت تأثير قوة بسبب الجاذبية. يتسارع البيانو إلى أسفل المنحدر بسرعة أبطأ من تسارعه في حالة سقوطه سقوطاً حرا.

خلال بعضهما. عوضاً عن ذلك، فإن محصلة القوة تشير بالضبط لاتجاه محاذٍ لسطح المنحدر - اتجاه مماس أو موازٍ للسطح. بالتحديد، سوف تشير مباشرة لاتجاه الانحدار، لذلك فإن البيانو يتسارع لأسفل المنحدر!

ولكن لأن محصلة القوة هذه أقل بكثير من وزن البيانو، فإن تسارع البيانو لأسفل المنحدر أبطأ من تسارعه إذا كان يسقط سقوطا حرا. هذا التأثير مألوف لأي شخص ركب دراجة نزولا من هضبة أو شاهد الانزلاق البطيء لكوب من على منضدة مائلة. بينما الجاذبية مازالت هي المسؤولة، هذه الأجسام تتسارع بشكل أبطأ من تسارع السقوط الحر واتجاه التسارع هو لأسفل المنحدر.

هنا يكمن جمال المنحدر، فبوضع البيانو على المنحدر، فإنك تجعل المنحدر يدعم معظم وزن البيانو. سيواجه البيانو فقط قوة محصلة صغيرة متبقية تدفعه للأسفل على طول المنحدر. الآن إذا دفعت البيانو للأعلى بقوة توازن تماماً تلك القوة الدافعة للأسفل، فإن محصلة القوة على البيانو ستنخفض إلى الصفر وسيتوقف البيانو عن التسارع. إذا دفعت للأعلى بقوة أكبر بقليل، فإن البيانو سيتسارع لأعلى المنحدر!

كيف يغير المنحدر عملية نقل البيانو؟ افترض أنك قمت ببناء منحدر طوله 50m ويمتد من الرصيف إلى شرفة الشقة والتي على ارتفاع 5m فوق مستوى الرصيف. يميل هذا المنحدر بحيث أنه كلما قطعت مسافة 10m على سطحه فإنه يرفع البيانو فقط 1m للأعلى (شكل ٥,٣,١). بسبب أن درجة ميل المنحدر 10 إلى 1، سيمكنك دفع البيانو الذي وزنه 2000N (450lbf) للأعلى بسرعة ثابتة بقوة مقدارها فقط 200N (45lbf). معظم الأشخاص يمكنهم أن يدفعوا بهذه القوة، لذا فإن عملية النقل الآن واقعية. فلكي تصل إلى الشقة، عليك أن تدفع البيانو مسافة 50m على طول هذا المنحدر بقوة مقدارها 200N حتى تبذل شغلاً إجمالياً مقداره 10,000J.

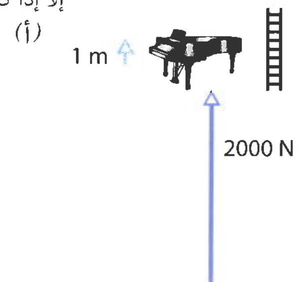
بدفعك البيانو لأعلى المنحدر، تكون قد استخدمت مبادئ فيزيائية لمساعدتك على القيام بمهمة قد يكون من المستحيل القيام بها بطريقة أخرى. ولكنك لم تحصل على شيء بدون مقابل، فالمنحدر أطول بكثير من السلم، واضطررت أن تدفع البيانو لمسافة أطول لرفعه للطابق الثاني. بالطبع، قمت بدفعه بقوة أقل.

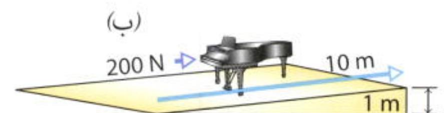
من المدهش أن مقدار الشغل الذي تبذله في كلا الحالتين هو 10,000J. فعند رفعك البيانو عن طريق استخدام السلم، فالقوة التي تبذلها كبيرة ولكن المسافة التي يقطعها البيانو في اتجاه هذه القوة قصيرة. وعند دفع البيانو لأعلى المنحدر، فإن القوة صغيرة ولكن المسافة طويلة. بأي الطريقتين، فإن النتيجة النهائية متساوية: البيانو سيصل للطابق الثاني بطاقة جذب كامنة إضافية مقدارها 10,000J وتكون قد بذلت شغلاً مقداره 10,000J. بتمثيل هذه المعادلة تصويرياً، ستظهر هذه العلاقة كالتالي:

الشغل = قوة كبيرة × مسافة صغيرة = قوة صغيرة × مسافة كبيرة

في غياب الاحتكاك، كمية الشغل الذي تبذله على البيانو لإيصاله للطابق الثاني لا تعتمد على الكيفية التي ترفعه بها. فبغض النظر عن طريقة رفعك للبيانو للطابق الثاني، فإن طاقة جذبه الكامنة ستزيد بمقدار 10,000J لذا يجب عليك أن تبذل شغلاً عليه مقداره 10,000J. حتى لو فككت البيانو لقطع وحملتها للأعلى واحدة واحدة باستخدام الدرج، ثم أعدت تركيبها في غرفة معيشة صديقك، ستكون قد بذلت شغلاً مقداره 10,000J في حمل البيانو.

إلا إذا كنت خبيراً في إعادة ضبط البيانو، فمن المحتمل أن الأفضل لك هو التمسك بخيار المنحدر. فالمنحدر يقدم طريقة





شكل ٥,٣,١ : لرفع بيانو يزن 2000N ، يمكنك إما (أ) دفعه رأسيا للأعلى أو (ب) دفعه على طول منحدر. لإبقاء البيانو متحركاً بسرعة ثابتة، يجب أن تتأكد أن محصلة القوى المؤثرة عليه هي صفر. إذا رفعته للأعلى باستخدام السلم كما في (أ)، فيجب عليك بذل قوة رفع للأعلى مقدارها 2000N لتوازن وزن البيانو المتجه للأسفل. وإذا دفعت البيانو لأعلى المنحدر كما في (ب) ، فعليك فقط دفع البيانو للأعلى بقوة مقدارها 200N لإعطاء البيانو محصلة قوة مقدارها صفر.

سهلة لشخص واحد لرفع بيانو كبير. المنحدر يوفر فائدة ميكانيكية – العملية التي تقوم بواسطتها الأداة الميكانيكية بإعادة توزيع مقدار القوة والمسافة المتطلبة لتأدية مقدار معين من الشغل الميكانيكي. فبنقلك البيانو بمساعدة المنحدر، قمت بإنجاز مهمة تتطلب في العادة قوة كبيرة لمسافة قصيرة عن طريق توفير قوة صغيرة لمسافة طويلة. قد تتساءل إن كان المنحدر نفسه يقوم بأي شغل على البيانو؛ الإجابة أنه لا يقوم بأي شغل. فعلى الرغم من أن المنحدر يبذل قوة دعم للبيانو، والبيانو يتحرك على طول سطح المنحدر، فإن هذه القوة والمسافة المقطوعة متعامدتان على بعضهما. المنحدر لا يقوم بأي شغل على البيانو.

الفائدة الميكانيكية تحدث في العديد من الحالات التي تستخدم المنحدرات. على سبيل المثال، تظهر عندما تركب دراجة صاعدا هضبة. فصعودك لهضبة ترتفع تدريجيا يتطلب قوة للصعود أقل بكثير منها عند صعود هضبة شديدة الانحدار لها نفس الارتفاع. بما أن تدويرك لدواسات الدراجة هو الذي يوفر قوة الصعود في النهاية، فإن صعود الهضبة ذات الارتفاع التدريجي أسهل بكثير من صعود الهضبة الشديدة الانحدار. بالطبع سيتحتم عليك قطع مسافة أطول في طريق صعود الهضبة القليلة الانحدار منها في الهضبة الشديدة الانحدار، لذا فإن الشغل الذي تبذله يكون متساوياً في كلا الحالتين.

تظهر المنحدرات والأسطح المائلة في العديد من الأدوات، حيث في الغالب تقوم بتقليل القوى اللازمة للقيام بمهمات يصعب تنفيذها بغيرها. كما أنها تغير من صفات بعض النشاطات أيضا. فالتزلج على الثلج لن يكون ممتعا كثيرا إذا كانت المنحدرات الثلجية الوحيدة الموجودة هي أفقية أو رأسية. باختيارك منحدرات تزلج متعددة التدرج، يمكنك اختيار محصلة القوى التي تطلق حركتك. فالمنحدرات الطفيفة تترك محصلة قوى صغيرة وتسارعاً صغيراً فقط؛ والمنحدرات الحادة تحدث محصلة قوة كبيرة وتسارعاً كبيراً.

أخيراً، ملاحظتنا حول الفائدة الميكانيكية هي: الفائدة الميكانيكية تسمح لك بالقيام بنفس الشغل، ولكن يجب عليك أن تقوم بمبادلة – أي يجب عليك أن تختار هل تريد قوة كبيرة أم مسافة طويلة. حاصل ضرب الجزئين، القوة في المسافة، يبقى نفسه.

تحقق من فهمك #٧: منحدرات المداخل (للإجابة، انظر صفحة ٣٢)

في الغالب تكون المنحدرات المخصصة للمعاقين عند مداخل المباني طويلة جدا، وقد تتضمن عدة انعطافات حادة. قد يبدو أن منحدراً أقصر وأكثر استقامةً سيكون ملائماً أكثر. ما هي الاعتبارات التي تقود المهندسين المصممين لهذه المنحدرات لجعلها طويلة جدا؟

خاتمة الفصل الأول

في هذا القسم تعرضنا لثلاث ممارسات يومية واستكشفنا القوانين الفيزيائية الأساسية التي تحكم سلوكها. ففي قسم التزلج على الجليد، تعرفنا على مفهوم القصور الذاتي ولاحظنا كيف أن الأجسام تتسارع فقط تحت تأثير قوى. في قسم الكرات الساقطة، قمنا بتقديم نوع مهم من أنواع القوى – الوزن – ورأينا كيف أن الوزن يؤدي إلى سقوط الأجسام غير المدعومة بتساريع متساوية متجهة إلى الأسفل.

في قسم المنحدرات، صادفنا نوعاً آخر من القوة – القوة الداعمة. كما رأينا كيف أن الشغل المبذول لتغيير ارتفاع جسم لا يعتمد على طريقة رفعه، لأن الشغل هو في الحقيقة الطريقة الميكانيكية لنقل الطاقة من جسم لآخر. كما لاحظنا أن الطاقة هي إحدى الكميات الفيزيائية المحفوظة التي تحكم حركة الأجسام في كوننا. نوع الطاقة المعين الذي درسناه في قسم المنحدرات هو طاقة الجذب الكامنة – الطاقة الكامنة المرتبطة بقوة الجاذبية.

تفسير: إزالة مفرش مائدة

تظل الأواني في مكانها بسبب قصورها الذاتي. كما رأينا، الجسم في حالة الحركة سيظل في حالة حركة، بينما الجسم الساكن سيظل في حالة سكون.

قبل أن تسحب مفرش الطاولة، تكون الأواني ساكنة على سطحها وتميل للبقاء على هذا الوضع. بسحبك المفرش من الطاولة بخفة وسلاسة قدر الإمكان، فأنت تضمن أن أي قوة يؤثر بها المفرش على الأواني تحدث فقط لفترة زمنية قصيرة جدا. نتيجة لذلك، فإن الأواني تخضع فقط لتغييرات طفيفة في سرعتها، وبالتالي تظل ثابتة على سطح الطاولة.

ملخص الفصل

كيفية عمل التزلج

عندما تنزلق إلى الأمام على زلاجات عديمة الاحتكاك، فأنت لن تواجه أي قوى أفقية وستتحرك بسرعة ثابتة. القصور الذاتي وحده هو الذي يدفعك إلى الأمام. لتغيير سرعتك - أي لتتسارع - لابد أن يؤثر عليك شيء بقوة أفقية. فالقوة المتجهة للأمام ستزيد سرعتك، بينما القوة المتجهة للخلف ستجعلك تتباطأ. بما أن القوى الجانبية تغير من اتجاه حركتك، فهي أيضا تجعلك تتسارع.

كيفية عمل الكرات الساقطة

أي كرة واقعة تحت تأثير قوة الجاذبية فقط هي كرة ساقطة. وهي تتسارع إلى الأسفل بمعدل ثابت. تؤثر الجاذبية على حركة الكرة الرأسية فقط، مسببة في زيادة مركبة سرعة الكرة الرأسية بمعدل ثابت في الاتجاه السفلي. إذا كانت الكرة تتحرك مبدئياً في الاتجاه الأفقي، فإنها سوف تستمر في تلك الحركة الأفقية وتنحرف في المدى الأمامي بمعدل ثابت وهي تسقط. الكرة الساقطة التي تبدأ بالصعود ستتوقف قريباً عن الصعود ثم تبدأ بالهبوط. كلما زاد مقدار مركبة السرعة الرأسية المبدئية، صعدت الكرة لفترة أطول وزاد ارتفاع القمة التي تصل إليه. ثم عندما تبدأ الكرة بالهبوط، فإن قمة الارتفاع تحدد الزمن الذي ستستغرقه الكرة لكي تصل إلى الأرض.

عندما تقذف كرة، فإن المركبة الرأسية للسرعة الابتدائية تحدد زمن تحليق الكرة في الهواء. والمركبة الأفقية للسرعة الابتدائية تحدد سرعة تحرك الكرة في المدى الأمامي. يختار الرامي بشكل حدسي السرعة الابتدائية والاتجاه اللازم لكي تتحرك الكرة المسافة المحددة بالضبط في المدى الأمامي في الزمن الذي تستغرقه في الهبوط إلى الارتفاع المطلوب.

كيفية عمل المنحدرات

يتعرض جسم ساكن على أرض مستوية لقوتين: وزنه للأسفل وقوة دعم الأرض له للأعلى والتي توازن وزن الجسم تماما. بالتالي فإن القوة المحصلة على الجسم تساوي صفرا. ولكن إذا استُبدلت الأرض بمنحدر، فإن القوة الداعمة لا تعود متجهة رأسيا للأعلى ومحصلة القوة على الجسم ليست صفرا. عوضا عن ذلك، فإن محصلة القوة تتجه للأسفل على طول المنحدر وتساوي وزن الجسم مضروبا بنسبة ارتفاع المنحدر إلى طوله. فإذا كان منحدر طوله 10m يرتفع 1m، فإن هذه النسبة هي 1m مقسوم على 10m أو 0.10. بالتالي، فإن محصلة القوة المتجهة للأسفل على طول المنحدر هي فقط 10 % من وزن الجسم.

لمنع جسم من التسارع لأسفل منحدر، عليك موازنة القوة للأسفل عن طريق دفع الجسم للأعلى بنفس القوة. في الحقيقة، إذا بذلت قوة لأعلى المنحدر مقدارها أكبر من القوة التي يتعرض لها الجسم عند الهبوط لأسفل المنحدر، فإن الجسم سيبدأ بالتسارع لأعلى المنحدر.

إن دفع جسم لأعلى منحدر يحتاج قوة أقل من رفعه رأسيا للأعلى، ولكن عليك أن تدفع الجسم مسافة أطول على طول المنحدر. إجمالا، الشغل الذي تبذله لرفع الجسم من ارتفاع لآخر هو نفسه، سواء استخدمت المنحدر أم لا. ولكن المنحدر يعطيك فائدة ميكانيكية، بالسماح لك بالقيام بشغل يتطلب قوة كبيرة غير واقعية عن طريق بذل قوة أصغر لمسافة أطول.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون نيوتن الأول للحركة: الجسم غير الخاضع لأي قوة خارجية يتحرك بسرعة ثابتة، ويقطع مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية على طول مسار خط مستقيم.

٢. قانون نيوتن الثاني للحركة: تسارع جسم يساوي القوة المؤثرة عليه مقسومة على كتلة الجسم أو

القوة = الكتلة × التسارع (٢،١،١)

٣. العلاقة بين الكتلة والوزن: وزن الجسم يساوي كتلته مضروبا بالتسارع بسبب الجاذبية، أو

الوزن = الكتلة × التسارع بسبب الجاذبية (١،٢،١)

٤. سرعة جسم تحت تأثير تسارع ثابت: سرعة الجسم الحالية تختلف عن سرعته لابتدائية بمقدار حاصل ضرب تسارعه في الزمن الذي استغرقه منذ أن كان عند تلك السرعة الابتدائية، أو

السرعة الحالية = السرعة الابتدائية + التسارع × الزمن (٢،٢،١)

٥. موقع جسم تحت تأثير تسارع ثابت: موقع الجسم الحالي يختلف عن موقعه الابتدائي بمقدار حاصل ضرب سرعته المتوسطة منذ أن كان في موقعه الابتدائي مضروبا بالزمن الذي استغرقه منذ أن كان عند موقعه الابتدائي، أو

الموقع الحالي = الموقع الابتدائي + السرعة الابتدائية × الزمن + $\frac{1}{2}$ التسارع × (الزمن)^2

(٣،٢،١)

٦. قانون نيوتن الثالث للحركة: لكل قوة يؤثر بها جسم على جسم آخر، توجد قوة أخرى مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه يؤثر بها الجسم الآخر على الجسم الأول.

٧. تعريف الشغل: الشغل المبذول على جسم يساوي حاصل ضرب القوة المبذولة على هذا الجسم في المسافة التي يقطعها الجسم في اتجاه هذه القوة، أو

الشغل = القوة × المسافة (١,٣,١)

٨. طاقة الجذب الكامنة: طاقة الجذب الكامنة لجسم هي حاصل ضرب كتلته في التسارع بسبب الجاذبية في ارتفاعه عن المستوى الصفري، أو

طاقة الجذب الكامنة = الكتلة × التسارع بسبب الجاذبية × الارتفاع (٢,٣,١)

تحقق من فهمك - الإجابات

١-١ التزلج

١.قرص لعبة الهوكي يتزحلق على الجليد لأن له قصور ذاتي.

لماذا: يكون قرص لعبة الهوكي الساكن على سطح جليد مبلل تقريبا حراً كليا من أي تأثيرات أفقية. فإذا دفع شخص ما هذا القرص، لكي يبدأ بالتحرك بسرعة أفقية عبر سطح الجليد، فإن القصور الذاتي سيضمن أن القرص سيستمر في التزحلق بسرعة ثابتة.

٢. يتسارع القطار إلى الأمام عندما يبدأ حركته من المحطة، ويتسارع للخلف عندما يصل للمحطة التالية، وإلى اليسار عندما يستدير لليسار، وإلى الأسفل عندما يبدأ بالهبوط من الجبال.

لماذا: كلما غيّر القطار من سرعته أو اتجاه سيره، فإنه يتسارع. فعندما يزيد من سرعته أثناء مغادرته لمحطة، فإنه يتسارع للأمام (زيادة في السرعة المتجهة للأمام). وعندما يتباطأ عند وصوله للمحطة التالية، فإنه يتسارع للخلف (زيادة في السرعة المتجهة للخلف أو نقص في السرعة المتجهة للأمام). وعندما يستدير لليسار يكون تسارعه لليسار (زيادة في السرعة المتجهة لليسار). وعندما يبدأ بالهبوط، فإنه يتسارع للأسفل (زيادة في السرعة المتجهة للأسفل).

٣. للسيارة كتلة أكبر من الدراجة.

لماذا: لإيقاف سيارة متحركة، يجب عليك أن تؤثر عليها بقوة متجهة عكس اتجاه سرعتها. عندها ستتسارع السيارة للخلف لتصل في النهاية لحالة السكون. فإذا كانت السيارة تسير باتجاهك، فعليك أن تدفعها بعيدا عنك. وكلما زادت كتلة السيارة، قلّ تسارعها استجابة لقوة معينة وطالت مدة دفعك لها حتى تتوقف كليا. فبينما من السهل إيقاف دراجة باليدين، فإن إيقاف سيارة باليدين، حتى لو كانت تتحرك ببطء، يتطلب بذل قوة كبيرة لفترة زمنية طويلة.

٤. الكنزة ستتحرك شرقا بسرعة ثابتة.

لماذا: مع أنكما تتفقان أن الكنزة لا تتسارع وأنها تتحرك وفقا لقانون نيوتن الأول، لكنكما تختلفان في سرعتها المحددة. هي ترى الكنزة في حالة سكون بينما تراها أنت تتحرك للشرق بسرعة ثابتة. وجهتا نظركما صحيحة على حد سواء.

٥. حوالي 2.24miles.

لماذا: هناك العديد من الوحدات المختلفة في هذا المثال، فيجب أن نقوم ببعض التحويلات. أولا: الساعة هي 3600s، لذا عندما تمشي ساعة واحدة بسرعة 1m/s، تكون قد قطعت مسافة 3600m. ثانيا: الميل حوالي 1609m فكلما قطعت مسافة 1609m تكن قد قطعت 1mile. فبمشي 3600m، تكون قد أكملت ميلين وقطعت ربع الميل الثالث.

٢-١ الكرات الساقطة

١. لن يكون لرائد الفضاء أي وزن (وزنه يساوي صفرا) ولكن سيظل له كتلة طبيعية.

لماذا: الوزن هو مقياس للقوة المؤثرة على رائد الفضاء بفعل الجاذبية. بعيدا عن الأرض أو أي جسم كبير، فإن رائد الفضاء لن يواجه فعليا أي قوة جذب وسيكون وزنه صفرا. ولكن الكتلة هي مقياس للقصور الذاتي ولا تعتمد على الجاذبية. حتى في الفضاء البعيد، سيكون إحداث تسارع لحافلة مدرسية أصعب بكثير من إحداث تسارع لكرة البيسبول لأن الحافلة المدرسية لها كتلة أكبر بكثير من كتلة كرة البيسبول.

٢. 4.9m/s (16ft/s) في الاتجاه إلى الأسفل.

لماذا: الجسم الساقط سقوطا حرا يتسارع للأسفل بمعدل ثابت. سرعته تتغير بمقدار9.8m/s (16ft/s) في الاتجاه للأسفل كل ثانية. في نصف ثانية، تتغير سرعة كرة الباراجون بنصف هذا المقدار أو 4.9m/s (16m/s).

٣. حوالي 1.2m (4ft).

لماذا: بينما تتغير سرعة جسم يسقط سقوطا حرا بمعدل ثابت في الاتجاه للأسفل، فإن ارتفاعه معقد أكثر من ذلك. عندما تسقط كرة الباراجون من حالة السكون، فإنها تبدأ هبوطها ببطء ولكن تزداد سرعتها وتقطع المسافة السفلية بسرعة أكبر وأكبر. في نصف الثانية الأول، ستقطع فقط ربع المسافة التي تقطعها في الثانية الأولى، أو حوالي 1.2m(4ft).

٤. الرصاصة أو السهم سيسقطان أثناء تحليقهما فيجب عليها أن تعوّض المسافة المفقودة في الارتفاع.

لماذا: لإصابة الهدف، على القناّصة أو الرامية أن تصوّب فوق الهدف لأن المقذوف سيسقط أثناء تحليقه. كلما مكثت الرصاصة أو السهم أطول في التحليق، زاد سقوطها وعليها أن تصوّب لارتفاع أعلى. وكلما زادت المسافة إلى الهدف، فإن زمن التحليق سيزيد وتصويبها يجب أن يكون للأعلى.

٣-١ المنحدرات

١. رفع الطوب جميعاً مرة واحدة.

لماذا: لرفع طوبة للأعلى بثبات، عليك أن تدعمها بقوة للأعلى مساوية لمقدار وزنها للأسفل. إذا رفعت عدداً من الطوب في وقت واحد، فستحتاج لدعمهم جميعاً وهذا سيتطلب قوة أكبر للأعلى.

٢. 50N ‏(11lb).

لماذا: حينما تؤثر بقوة مقدارها 50N على جسم، سواء كان متحركا أو ساكنا، فإنه سيؤثر بقوة مقدارها 50N عليك. لا يوجد أي استثناءات. إذا كان هذا الجسم هو صديقك، فلا يهم إن كان ساكنا أو متحركا أو يرتدي زلاجات أو حتى غارقًا في النوم: سيدفعك بقوة مقدارها 50N . ليس له خيار في الأمر. وبالمثل، إذا دفعك شخص ما، فإنك ستشعر بدفعك له. هكذا يعمل قانون نيوتن الثالث.

٣. القوتان هما قوة الجاذبية للأسفل (وزنك) وقوة دعم الأرض للأعلى. تتوازن هاتان القوتان، حتى تكون محصلة القوى عليك صفرا.

لماذا: متى ما تحرك شيء بسرعة ثابتة، فإنه لا يتسارع، وبالتالي يكون عليه محصلة قوة مقدارها صفر. على الرغم من أن المصعد يتحرك للأعلى، كونك لا تتسارع يعني أن المركبة تبذل عليك قوة دعم للأعلى توازن وزنك تماماً. أنت تتعرض لمحصلة قوة مقدارها صفر.

٤. نعم، جميعها.

لماذا: كل من هذه الأجسام الأربعة يمكنها بسهولة بذل شغل عليك، وبالتالي تعطيك بعضاً من طاقتها الإضافية. هي تقوم بهذا الشغل عن طريق دفعك بينما أنت تتحرك في اتجاه هذا الدفع.

٥. نعم.

لماذا: متى ما تؤثر بقوة على جسم ويتحرك هذا الجسم باتجاه هذه القوة، فإنك تبذل شغلاً على هذا الجسم. وبما أن الجاذبية لا تؤثر على الحركة الأفقية، فإن الشغل الذي تبذله على كرة البيسبول وأنت تقذفها ينتهي به المطاف في الكرة كطاقة حركية (الطاقة الناتجة عن الحركة). أي شخص سبق له أن ضُرب بكرة مقذوفة يمكنه أن يشهد بأن الكرة المتحركة لها طاقة أكثر من الكرة الساكنة.

٦. عند قمة الجبل.

لماذا: يصعب صعود الجبل بدراجة لأنه يتحتم عليك بذل شغل ضد قوة الجاذبية. هذا الشغل يُخزّن على هيئة طاقة جذب كامنة تتزايد أثناء صعودك للأعلى. بعدها تقوم الجاذبية ببذل شغل عليك أثناء تدحرجك للأسفل وتتناقص طاقة جذبك الكامنة.

٧. يجب على المهندسين أن يحدوا من مقدار القوة المطلوبة لدفع كرسي متحرك بثبات لأعلى منحدر. كلما زاد انحدار المنحدر، زادت القوة المطلوبة.

لماذا: يتعرض الشخص الذي يسير بكرسي متحرك على سطح مستوٍ لقوة أفقية طفيفة ويمكنه أن يتحرك بسرعة ثابتة ببذل جهد قليل. ولكن صعود منحدر بسرعة ثابتة يتطلب قوة كبيرة للأعلى مساوية في المقدار لقوة الجاذبية للأسفل. كلما زاد انحدار المنحدر، زادت قوة الدفع للأعلى المتطلبة للمحافظة على ثبات السرعة. نسبة انحدار بمقدار 12 إلى 1 (12 متر على طول المنحدر لكل متر ارتفاع) هي النسبة المقبولة لانحدار مثل هذا المنحدر الطويل.

دقق في أرقامك - الإجابات

١-١ التزلج

١. الكرة ذات الكتلة الأقل ستتسارع بضعف المعدل.

لماذا: المعادلة (١,١,١) توضح أن تسارع جسم يتناسب عكسيا مع كتلته:

التسارع = القوة / الكتلة

فإذا دفعت كرتي البولنج بقوى متساوية، سيعتمد تسارعهما على كتلتيهما فقط. مضاعفة الكتلة في الطرف الأيسر من المعادلة ينصّف التسارع في الطرف الأيمن. هذا يعني أن الكرة ذات الكتلة الأكبر ستتسارع فقط بنصف معدل الكرة الأخرى.

٢-١ الكرات الساقطة

١. حوالي $1.6m/s^2$ ‏($5.3ft/s^2$)

لماذا: يمكنك إعادة ترتيب معادلة (١,٢,١) لتوضح أن التسارع بسبب الجاذبية يتناسب مع وزن الجسم:

التسارع بسبب الجاذبية = الوزن / الكتلة

لن تتغير كتلتك عندما تذهب للقمر، لذا فإن أي تغير في وزنك يجب أن يكون بسبب تغير التسارع بسبب الجاذبية. بما أن وزنك على القمر هو سدس وزنك على الأرض، فإن التسارع بسبب الجاذبية في القمر يجب أن يكون سدس ما هو عليه في الأرض، أو حوالي $1.6m/s^2$.

٢. حوالي (31mph ‏(50km/h)، (54ft/s)، (14m/s).

لماذا: التسارع للأسفل بسبب الجاذبية مقداره $9.8m/s^2$ ‏($32ft/s^2$). أنت تسقط لمدة 1.4s، وخلال هذا الزمن فإن سرعتك تتزايد بمعدل ثابت في الاتجاه للأسفل. بما أنك بدأت بسرعة مقدارها صفر، فإن معادلة ١,٢,٢ تعطي سرعة نهائية مساوية لـ

السرعة النهائية = $(9.8m/s^2)\ (1.4s) = 13.72m/s$

بما أن زمن السقوط معطى فقط لخانتي دقة (1.4s يمكنها أن تكون 1.403s أو 1.385s)، فيجب أن لا ندّعي أن حسابنا للسرعة النهائية دقيق لأربع خانات دقة. فعلينا أن نقرّب النتيجة إلى 14m/s ‏(45ft/s).

٣. حوالي 122 متراً (402ft أو بناية ذات أربعين طابق).

لماذا: أثناء سقوطهم، سيتحرك القافزون للأسفل بسرعات متزايدة. بما أنهم بدأوا حركتهم من السكون ويسقطون للأسفل لمدة خمس ثوانٍ، فإنه يمكننا استخدام معادلة (٣,٢,١) لتحديد المسافة التي سيسقطونها:

الارتفاع النهائي =

الارتفاع الابتدائي – $½ \cdot 9.8m/s^2 \cdot (5s)^2$ = الارتفاع الابتدائي - 122.5m

إن التسارع للأسفل يعبر عنه هنا بالتغير السالب في الارتفاع. في نهاية الخمس ثواني، يكون القافزون قد سقطوا أكثر من 122m ‏(402ft) وتكون سرعتهم للأسفل حوالي 50m/s ‏(160ft/s). سيحتاج البرج ارتفاعاً إضافياً لتبطئة القافزون والبدء بارتدادهم للأعلى. من الواضح أن سقوطاً حراً لمدة خمس ثوانٍ غير واقعي. جرّب سقوطاً حراً مدته ثانيتان أو ثلاث ثوان بدلاً من ذلك.

٣-١ المنحدرات

١. سيأخذ 120N.m (88.6ft.Ibf) ، بغض النظر عن العدد الذي ترفعه في المرة الواحدة.

لماذا: لمنع كل كتاب من التسارع للأسفل، عليك أن تدعم وزنه بقوة للأعلى مقدارها 10.0N. بعد ذلك يجب أن تحركها مسافة 1.20m للأعلى. الشغل الذي تبذله لدفع الكتاب للأعلى وهو يتحرك للأعلى يعطى بالمعادلة 1.3.1 :

الشغل = القوة · المسافة = 10N · 1.2m = 12N · m

إذاً سيتطلب شغلاً قدره 12N · m لرفع كل كتاب، سواء رفعته مع كتب أخرى أو رفعته وحده. الشغل الكلي الذي يجب أن تبذله على العشر كتب هو 120N.

٢. حوالي 11J

لماذا: طاقة الجذب الكامنة لعملة البنس معطاة بالمعادلة ١،٣،٢:

طاقة الجذب الكامنة = 0.0025k · 9.8N/kg = 443.2m = 11J

إن هذه الـ 11J من الزيادة في الطاقة ستكون واضحة جدا إذا أسقطت عملة البنس. نظريا، عملة البنس يمكنها أن تتسارع لسرعات عالية جدا (تصل إلى 340km/h أو 210mph) وتُحدث ضرراً كبيراً عندما تصطدم بالأرض. من حسن الحظ أن سرعة عملة البنس الساقطة تقل لدرجة كبيرة بفعل الهواء مما لا يجعلها خطيرة جدا.

تمارين

١. يمكن للدولفين أن يقفز عدة أمتار فوق سطح المحيط. لماذا لا تمنع الجاذبية الدولفين من ترك الماء؟

٢. عندما تقفز عبر جدول صغير، هل هناك قوة أفقية تبقيك متحركا للأمام؟ إن كان هناك، فما هي تلك القوة؟

٣. لماذا الضرب على الأرض بقدميك ينظفها من الثلج العالق بها؟

٤. لماذا نقرك المتكرر لفرشاة أسنانك على حافة المغسلة يجففها؟

٥. في ظهر مقعد سيارتك يوجد وسادة لحماية رقبتك أثناء الاصطدام. ما هو نوع التصادم الذي يجعل رأسك يضغط على هذه الوسادة؟

٦. يمكن لسائق لا يرتدي حزام الأمان أن يؤذيه مقود القيادة أثناء تصادم رأسي. لماذا يصطدم السائق بمقود القيادة عندما تتوقف السيارة فجأة؟

٧. لماذا تتحرك الأشياء الموجودة على سطح لوحة العدادات في السيارة إلى اليمين عندما تستدير السيارة فجأة إلى اليسار؟

٨. لماذا تتغير سرعتك بشكل مستمر عندما تركب (كاروسيل) دوامة الخيل في الملاهي؟

٩. عندما تستخدم مكابح دراجتك، في أي اتجاه ستتسارع؟

١٠. أحد أنواع طاحنات القهوة المنزلية يتكون من شفرة تدور بسرعة كبيرة تقطّع حبات القهوة إلى أن تصبح مسحوقاً. لا يوجد أي شيء يمنع حبات القهوة من الحركة فلماذا إذاً لا تبتعد عن الشفرة عندما تبدأ الشفرة بالدفع عليها؟

١١. في العادة، يطرق الحدّاد المعدن الساخن على سطح سندان فولاذي ضخم. لماذا تكون هذه الطريقة أكثر فعالية من طرق المعدن الساخن على سطح فولاذي رفيع؟

١٢. العدّاء الذي يركض في سباق الـ 200 متر يقطع الـ 100 متر الثانية في فترة زمنية أقصر بكثير من الـ 100 متر الأولى. لماذا؟

١٣. إذا سحبت الورقة العلوية من مفكرة ببطء، فإن المفكرة بأكملها ستتحرك. ولكن إذا شددت هذه الورقة فجأة، فإنها ستنزع من المفكرة. ما الذي يسبب هذين السلوكين المختلفين؟

١٤. كرة تسقط من وضع السكون لمدة خمس ثوانٍ. بإهمال مقاومة الهواء، خلال أيٍّ من هذه الثواني الخمسة تزيد سرعة الكرة أكثر؟

١٥. إذا أُسقطت كرة من ارتفاع 4.9m ، فإنها ستصطدم بالأرض بعد ثانية واحدة. إذا أطلقت رصاصة باتجاه أفقي تماما من على ارتفاع قدره 4.9m ، فإنها أيضاً ستصطدم بالأرض بعد ثانية واحدة. فسّر ذلك.

١٦. تسقط جوزة البلوط من غصن على ارتفاع 9.8m من سطح الأرض. بعد ثانية واحدة من السقوط، ستكون سرعة الجوزة 9.8m/s للأسفل. لماذا لم تصطدم الجوزة بالأرض؟

١٧. يقفز غوّاص في الماء من هضبة ترتفع 50-m . الهضبة ليست رأسية تماما فعلى الغوّاص أن يسير بضعة أمتار إلى الأمام حتى لا يصطدم بالصخور التي تقع تحته. في الحقيقة، هو يقفز للأمام مباشرة بدلا من الأعلى، فسّر لماذا القفز للأمام يمكنه من تخطي الصخور.

١٨. الراكل في مسابقة رياضية ليس مهتماً دائماً بالمسافة التي تقطعها الكرة في المدى الأمامي. في بعض الأحيان يكون زمن تحليق الكرة في الهواء أهم. فإذا أراد أن يُبقي الكرة محلقة في الهواء لأطول فترة زمنية ممكنة، فما هي الطريقة التي يجب أن يركلها بها؟

١٩. رؤوس عصي لعبة الغولف المختلفة ممالة بزوايا لكي تعطي الكرة سرعات ابتدائية مختلفة. تظل سرعة كرة الغولف ثابتة تقريباً، ولكن تختلف زاوية

الانطلاق باختلاف العصي. بإهمال أي تأثير للهواء، كيف يؤثر تغيير زاوية الانطلاق الابتدائية على المسافة التي تقطعها الكرة؟

٢٠. يسحب زورق سريع متزلجة على الماء بواسطة حبل، باذلاً قوة أمامية كبيرة عليها. تسير المتزلجة إلى الأمام في خط مستقيم بسرعة ثابتة. ما هي محصلة القوة التي تتعرض لها؟

٢١. تزن حقيبتك 50N. عندما تصعد درجاً كهربائياً متجهاً للطابق الثاني وأنت تحمل حقيبتك، فإنك تتحرك بسرعة ثابتة. ما مقدار القوة للأعلى التي يجب أن تبذلها على الحقيبة لتبقيها متحركة معك؟

٢٢. ما هي محصلة القوة على (ا) العربة الأولى، و(ب) العربة الوسطى، و(ج) العربة الأخيرة في قطار كهربائي يسير بسرعة ثابتة؟

٢٣. يلعب فريقان لعبة شدّ الحبل باستخدام حبل قويّ. إلى الآن الفريقان متعادلان، فلم يتحرك أي من الفريقين. ما هي محصلة القوة على الفريق الأيسر؟

٢٤. عندما تركل كرة قدم، فأيهما يدفع الآخر بقوة أكبر: قدمك أم كرة القدم؟

٢٥. تبذل الكرة الأرضية قوة للأسفل مقدارها 850 N على رائد فضاء مخضرم أثناء عمله خارج مركبته الفضائية. ما هي القوة (إن وجدت) التي يبذلها رائد الفضاء على الكرة الأرضية؟

٢٦. تمر سيارة أمامك، متجهة إلى يسارك، وأنت تمد يدك وتدفعها لليسار بقوة مقدارها 50N. هل هذه السيارة المتحركة تدفعك، وإذا كانت الإجابة نعم، فما مقدار هذه القوة؟

٢٧. أيهما أكبر: القوة التي تبذلها الأرض عليك أم القوة التي تبذلها أنت على الأرض؟

٢٨. كثيراً ما يقوم أبطال القصص الكرتونية بالإمساك بشخص ساقط على بُعد قليل فقط من الأرض. لماذا في الحقيقة يكون هذا الإنقاذ خطيراً على الضحية، تماما مثل خطر ارتطامه بالأرض؟

٢٩. بالخطأ لم تنتبه لمدخل الباب واصطدمت بالحائط. فجأة تشعر بقوة دفع للخلف أكبر من وزنك بعدة مرات. ما هو مصدر هذه القوة؟

٣٠. عندما تُطير طائرة ورقية، فإن هناك وقتاً يجب أن تقوم فيه بشغل (موجب) على الطائرة. هل هذا الوقت هو عندما تفلت الطائرة أم عندما تشدها؟

٣١. أيهما يبذل شغلا أكبر في رفع حبة أرز فوق رأسها: نملة أم إنسان؟ استخدم هذه النتيجة لتفسير كيفية قيام الحشرات بما يبدو أنها أعمال مدهشة وبطولية من رفع وقفز؟

٣٢. هل تقوم بشغل وأنت تعجن الخبز؟ إذا كانت الإجابة نعم، فمتى؟

٣٣. بينما تقوم بتعليق صورة على الحائط، تحدث انبعاجاً فيه بالخطأ باستخدام مطرقة. هل بذلت المطرقة شغلاً على الحائط؟

٣٤. تقوم بتقطيع خشب باستخدام منشار يدوي. عليك أن تدفع المنشار بعيدا عنك عندما يتحرك بعيدا عنك وتسحب المنشار باتجاهك عندما يتحرك باتجاهك. متى تبذل شغلا على المنشار؟

٣٥. في لعبة الكرة المتدحرجة (pinball)، تتدحرج الكرة الفولاذية على سطح مستوٍ ومائل. فإذا نقرت الكرة مباشرة لأعلى الانحدار، فإنها ستتباطأ تدريجيا إلى أن تقف ثم تتدحرج لأسفل الانحدار. ما هو اتجاه تسارع الكرة عندما تتدحرج للأعلى؟ وللأسفل؟

٣٦. لماذا يقل تجمّع الثلج وأنواع الحطام الأخرى على سطح منحدر مقارنة بسطح مستوٍ؟

٣٧. تقوم بدحرجة كرة الباراجون من على زلاقة ملاهي الأطفال والتي تبدأ بجزء مستوٍ، ثم تتقوس إلى الأسفل وأخيرا تتقوس تدريجيا للأعلى إلى أن تصبح في النهاية مستوية مرة أخرى. أين تواجه كرة الباراجون أعلى تسارع على طول مسار حركتها؟ وأعلى سرعة؟

٣٨. عندما تتزلج على رصيف مستوٍ، يمكنك المحافظة على سرعتك وقتاً طويلاً. ولكن بمجرد أن تبدأ بصعود هضبة ترتفع تدريجيا، فإنك ستبدأ بالتباطؤ. ما الذي جعلك تتباطأ؟

٣٩. عندما تخفق كابحات شاحنة في إيقافها، فإن سائقها يوجهها لصعود منحدر للشاحنات. بصعود الشاحنة لأعلى المنحدر ستتباطأ إلى أن تقف. ماذا يحدث لطاقة الشاحنة الحركية، أي الطاقة الناتجة عن حركتها؟

مسائل

١.إذا كانت كتلة سيارتك 800kg، ما هو مقدار القوة المطلوبة لكي تتسارع السيارة إلى الأمام بمقدار $4m/s^2$؟

٢. إذا تسارعت سيارتك من السكون بمعدل ثابت مقداره $4m/s^2$، متى ستصل لسرعة 88km/h (55mph أو 24.6m/s)؟

٣. على كوكب المريخ، التسارع بسبب الجاذبية مقداره $3.71m/s^2$. كم ستكون سرعة حجر على المريخ بعد إسقاطه بثلاث ثوانٍ؟

٤. ما هي مسافة سقوط حجر خلال ثلاث ثوانٍ إذا أسقطته على المريخ؟ (انظر مسألة ٣)

٥. قارن بين وزنك على المريخ ووزنك على الأرض؟ (انظر مسألة ٣)

٦. يستطيع لاعب كرة سلة أن يقفز للأعلى مسافة 0.5m. ما هي سرعته الابتدائية عند بدء القفز؟

٧. كم من الوقت يظل لاعب كرة السلة المذكور في المسألة ٦ محلقا في الهواء؟

٨. يستطيع عدّاء أن يصل لسرعة 10m/s في 1s. إذا كان تسارع العدّاء ثابتا خلال هذه الفترة، ما هو تسارع العدّاء؟

٩. إذا كانت كتلة عدّاء هي 60kg ، فما هو مقدار القوة الأمامية التي يجب أن تُبذل على العداء لجعله يتسارع بمقدار $0.8m/s^2$؟

١٠. ما هو وزن إنسان على الأرض كتلته 60kg؟

١١. إذا قفزت للأعلى بسرعة 2m/s، فكم من الوقت سيمر قبل أن تتوقف عن الصعود؟

١٢. كم سيكون ارتفاعك عندما تتوقف عن الصعود في المسألة ١١؟

١٣. ما مقدار القوة التي يجب أن تبذلها قاطرة على مركبة كتلتها 12,000kg لجعلها تتسارع للأمام بمعدل $0.4m/s^2$؟

١٤. كم من الزمن ستحتاج المركبة في مسألة 13 لتصل لسرعة مقدارها 100km/h (62mph أو 28m/s)؟

١٥. استعمل بُناة الأهرامات منحدرات طويلة لرفع قوالب حجرية كتلتها 20,000kg (22طن) .إذا ارتفع قالب 1m بعد تحركه 20m على سطح المنحدر، ما مقدار القوة اللازمة لدفعه لأعلى المنحدر بسرعة ثابتة؟

١٦. ما مقدار الشغل الذي بُذل لرفع أحد القوالب الحجرية في مسألة ١٥ لارتفاع 50m؟

١٧. ما مقدار طاقة الجذب الكامنة لقالب واحد في مسألة ١٥ إذا وصل ارتفاعه الآن إلى 75m فوق سطح الأرض؟

١٨. بينما يسقط الماء من قمة سد كهرومائي طويل، تتحول طاقة جذبه الكامنة إلى طاقة كهربائية. ما مقدار طاقة الجذب الكامنة التي تصدر عندما يسقط 1000 kg من الماء مسافة 200m ليصل للمولّدات؟

١٩. يحتاج إطار دراجتك للهواء فتربط مضخة هواء له وتبدأ بدفع مقبض المضخة للأسفل. إذا بذلت على المقبض قوة للأسفل مقدارها 25N وتحرك المقبض للأسفل مسافة 0.5m، ما هو مقدار الشغل الذي تقوم به؟

٢٠. تستخدم وتداً لفلق جذع شجرة. تقوم بضرب الوتد بمطرقة كبيرة لتدفعه داخل الجذع. يحتاج الأمر إلى قوة مقدارها 2000N لكي يندفع الوتد داخل الخشب. إذا تحرك الوتد مسافة 0.2m داخل الجذع، فما مقدار الشغل الذي بذلته على الوتد؟

٢١. الوتد في المسألة ٢٠ يعمل مثل المنحدر، يفلق الخشب ببطء أثناء دخوله الجذع. الشغل الذي تبذله على الوتد، بدفعه إلى داخل الجذع، هو الشغل الذي يبذله الوتد على الخشب، بفصل الجذع لجزئين. إذا انفصل الجزءان عن بعضهما مسافة قدرها 0.05m فقط بينما تحرك الوتد 0.2m داخل الجذع، فما هو مقدار القوة التي يبذلها الوتد على جزئي الجذع لفصلهما عن بعض؟

٢٢. تقوم بصنفرة طاولة. يجب عليك أن تبذل قوة مقدارها 30N على ورق الصنفرة لإبقائه يتحرك بثبات على سطح الطاولة. تقوم بتمرير الورقة ذهابا وإيابا لمدة 20 دقيقة، خلالها تكون قد حرّكت الورقة مسافة1000m. ما مقدار الشغل الذي قمت به؟

الفصل ٢

قوانين الحركة الجزء الثاني

في الفصل الأول، تعلمنا كيف تتحرك الأشياء من مكان لآخر وبدأنا نطوّر فهمنا عن الطاقة والتي هي كمية محفوظة مهمة. ولكن الحركة ليست مقصورة على التغير في الموقع، والطاقة ليست الكمية المحفوظة الوحيدة في الطبيعة. في هذا الفصل، سنلقي نظرة على نوع ثانٍ من الحركة - الدوران - وأيضا على كميتين محفوظتين أخرتين - كمية الحركة وكمية الحركة الزاوية. الأجسام ذات الحركة الدورانية شائعة إلى حد كبير، وسنجد أنه من المفيد فهم قوانين حركتها قبل التقدم أكثر. فعندما نتمكن من فهم هذه المفاهيم الإضافية بدقة سنكون مستعدين لاستكشاف الفيزياء الموجودة خلف تشكيلة واسعة من الأجسام الميكانيكية.

تجربة: دوران طبق فطيرة

قد يبدو جعل طبق يدور فوق عمود رفيع نشاطاً بسيطاً. لكن لا تدع مظهره غير المعقد يخدعك: هناك العديد من المفاهيم الفيزيائية التي تشارك في المحافظة على دوران الطبق، وفي تبطئته تدريجيا، وفي منعه من السقوط من فوق العمود.

طريقة سهلة للقيام بتجربة دوران الطبق هي أن تقوم بلصق قلم رصاص رأسيا على حافة طاولة أو مقعد بحيث تكون ممحاته مرتفعة بضع بوصات في الهواء. لتجنب مشاكل التذبذب، يجب أن يثبّت اللصق قلم الرصاص في مكانه بقوة وتكون الطاولة والمقعد متينين ومستقرين.

الآن استعد لموازنة طبق فطيرة معدني على الممحاة قبل أن تقوم بتدويره. إذا لم يكن لديك طبق فطيرة، فيمكنك استخدام الفرِزْبي (الطبق الطائر)، أو طبق عميق من البلاستيك أو طاسٍ بلاستيكي غير عميق كبديل. كن مبدعا. بالتأكيد ستجد شيئا ينفع. فقط لا تستخدم أطباق جدّتك الخزفية الموروثة إلا إذا كنت مستعدا لمواجهة العواقب المحتملة.

إن أول شيء يجب أن تقوم به هو محاولة موازنة الطبق على الممحاة. حاول أن تتنبأ هل هذا العمل سيكون سهلاً أم صعباً. هل سيهم كون الطبق مفتوحاً للأعلى أو للأسفل؟ لاحظ ماذا سيحدث عندما تضع الطبق على الممحاة. هل تحققتَ من تنبئك؟



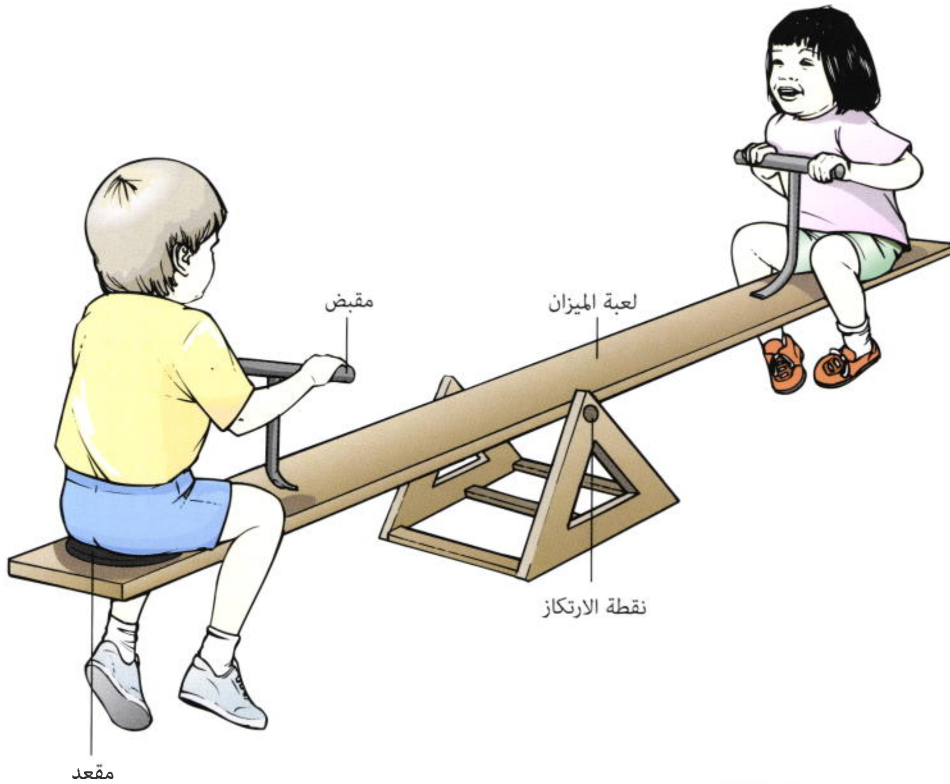


بإذن من لوي بلومفيلد

توصل لوضعية يتوازن فيها الطبق جيداً ثم قم بإعطاء الطبق دورة بلطف. ما هو نوع التأثير الذي يجب أن تبذله على الطبق لجعله يبدأ بالدوران؟ إذا لم يتذبذب الطبق وبقي قلم الرصاص ثابتاً، فإن الطبق سيستمر في الدوران فترة قبل أن يتوقف. في اللحظة التي لم تعد فيها ملامسا الطبق، ما الذي يجعله يستمر في الدوران؟ من جانب آخر، لماذا لا يستمر في الدوران للأبد؟ الآن قم بقلب قلم الرصاص ليكون طرفه الحاد مشيراً للأعلى. ماذا سيحدث عندما تضع الطبق على هذا الطرف؟ هل سيظل الطبق في حالة توازن؟ عندما تقوم بتدوير الطبق، هل سيدور لفترة زمنية أطول أم أقصر مقارنة بدورانه على الممحاة؟ حاول أن تقيس كيف يؤثر تغيير نقطة الارتكاز التي يدور الطبق حولها على مدة الدوران. إذا كان الطبق مرناً ونقطة الارتكاز تحدث انبعاجاً فيه، احم سطح الطبق بلصْق عملة نقدية عليه. كيف أثـّرت نقطة الارتكاز المطورة هذه على دوران الطبق؟ هل يمكنك أن تطيل زمن دوران الطبق بلصق أثقال حول محيط حافة الطبق؟ هل هناك طريقة لجعل الطبق يدور فقط بالنفخ عليه؟ هل يمكنك أن تربط بين هذه الحركة وحركة دوران متزلج أو عجلة دراجة؟

دليل الفصل

سنقوم بدراسة قوانين الحركة الدورانية وكميتين محفوظتين جديدتين ضمن إطار ثلاثة أجسام موجودة في حياتنا اليومية: (١) لعبة الميزان، (٢) العجلات، (٣) سيارت التصادم في الملاهي. في قسم لعبة الميزان، سنبحث في اللفات والدوران، ونرى كيف يمكن لطفلين أن يقوما بهزّ لعبة الميزان فوق وتحت. وفي قسم العجلات، سندرس كيف يؤثر الاحتكاك على الحركة ونتعلم كيف يمكن للعجلات أن تجعل العربة أكثر تحركا. في قسم سيارات التصادم في الملاهي، سنتعلم الفيزياء التي تكمن خلف التصادمات ونزيل الغطاء عن بعض القوانين البسيطة التي تحكم ما تبدو في بادئ الأمر أنها حركات معقدة. لعرض أكثر شمولية لما سنتعرض له في هذا الفصل قم بقلب الصفحات لملخص الفصل في صفحة ٦٩.



٢-١ لعبة الميزان

المنحدر الذي سبق أن تناولناه في قسم ١-٣ هو مجرد نوع واحد من الأدوات التي توّفر الفائدة الميكانيكية. في هذا القسم، سننظر في أداة أخرى: نوع من أنواع الروافع الذي يعرف بلعبة الميزان. عندما نناقش لعبة الميزان سنعود للعديد من قوانين الحركة التي تعرضنا لها في الفصل السابق. ولكن سنرى هذه القوانين في سياق جديد: الحركة الدورانية.

أسئلة للتفكير

تتوازن لعبة الميزان في ساحة اللعب فقط عندما يكون الأطفال الذين يركبونها في وضعية صحيحة. ماذا نعني بلعبة ميزان متوازنة؟ لماذا موضع جلوس الأطفال على لعبة الميزان مهم؟ ما الذي يقومون به لجعل لعبة الميزان المتوازنة تتأرجح فوق وتحت؟ من يقوم بشغلٍ على مَن وهم يتأرجحون؟

تجارب يمكن القيام بها

لكي تتلمس كيفية عمل الروافع، ابحث عن مسطرة صلبة لها ثقب في منتصفها - مثل التي تُشبك في المجلدات ذات الثلاث حلقات. إذا قمت بدعم المسطرة بوضع طرف قلم رصاص في الثقب المركزي، فإنك ستجد أن المسطرة تتوازن؛ أي أنها إما أن تظل ساكنة في وضعية تختارها أو تدور بثبات حول الثقب المركزي. (في النهاية، ستصل المسطرة للسكون بفعل الاحتكاك، الأمر الذي سنستمر في إهماله حاليا.) والآن، قم بدفع أحد طرفي المسطرة. ماذا يحدث؟ حاول أن تدفع طرف المسطرة باتجاه الثقب المركزي. ماذا يحدث عندئذ؟ ما هي الطريقة الأكثر فعالية لجعل المسطرة تدور؟
الآن قم بوضع قلم الرصاص على طاولة وضَعْ المسطرة فوقه بشكل مسطح، بحيث يكون قلم الرصاص والمسطرة متعامدين على بعضهما أي يشكلان زاوية قائمة. إذا وضعت مركز المسطرة على قلم الرصاص فإن المسطرة ستكون في وضع اتزان. قم بوضع عملات نقدية أو أي أثقال صغيرة على طرفي المسطرة مع محاولة المحافظة على توازن المسطرة. حاول وضع العملات النقدية على مسافات مختلفة بالنسبة لقلم الرصاص. هل هناك طريقة يمكنك بها أن توازن بين وزن خفيف في طرف مع وزن ثقيل في الطرف الآخر؟

لعبة الميزان

يعرف أي طفل لعب على لعبة الميزان مع أصدقاء مختلفين في الأحجام أن هذه اللعبة تعمل بشكل أفضل مع طفلين لهما نفس الوزن تقريباً (شكل ١,١,٢ أ). فالركّاب المتكافئون يوازنون بعضهم البعض، وهذا التوازن يسمح لهم بالاهتزاز لفوق وتحت بسهولة. على النقيض من ذلك، عندما يحاول طفل خفيف أن يلعب على الأرجوحة مع طفل ثقيل، فإن طرف الأرجوحة الذي به الطفل الثقيل يهبط بسرعة ويصطدم بالأرض مع إصدار صوت ارتطام (شكل ١,١,٢ ب). أما الطفل الخفيف فيقذف في الهواء.

هناك عدة حلول لمشكلة الطفل الثقيل والطفل الخفيف. بالطبع، يمكن لطفلين خفيفين أن يحاولا موازنة طفل واحد ثقيل. ولكن معظم الأطفال في النهاية يستنتجون أنه إذا جلس الطفل الثقيل أقرب من نقطة ارتكاز الأرجوحة فإن الأرجوحة ستتوازن (شكل ١,١,٢ ج). عندها يمكن للأطفال أن يجعلوا الأرجوحة تميل ذهابا وإيابا بسهولة، تماما مثل ما يحدث عند ركوب طفلين متكافئين على أطرافها. هذه خدعة مفيدة، وسوف نستكشفها لاحقا في هذا القسم. ولكن أولا سنحتاج أن ننظر بعناية في طبيعة الحركة الدورانية.

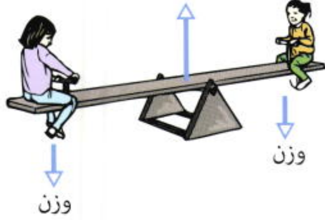
للتبسيط، دعنا نهمل كتلة ووزن لعبة الميزان ذاتها. هناك إذاً فقط ثلاث قوى تؤثر على لعبة الميزان الموضحة في الشكل (١,١,٢) : قوتان للأسفل (وزنا الطفلين) وقوة واحدة للأعلى (قوة دعم نقطة الارتكاز المركزية). بالنظر لهذه القوى الثلاثة، فإننا قد نفكر فورا بمحصلة القوى ونبدأ بالبحث عن التسارع الإجمالي لهذه اللعبة وركابها. ولكننا نعلم أن لعبة الميزان تظل في مكانها في ساحة اللعب وليس من المحتمل أن تنطلق نحو مدينة كالامازو (مدينة في الولايات المتحدة الأمريكية) أو إلى مركز الأرض في أي وقت قريب. بما أن نقطة ارتكاز لعبة الميزان الثابتة دائماً توفر القوة الكافية للأعلى أو للجوانب لمنع الأرجوحة من التسارع بأكملها، فإن محصلة القوة على لعبة الميزان تكون صفراً دائماً ولا تغادر ساحة اللعب أبداً. إن الحركة الإجمالية للجسم التي تنقله من مكان لآخر تسمى حركة انتقالية. مع أن لعبة الميزان لا تواجه هذا النوع من الحركة إلا أنها تستطيع أن تدور حول نقطة الارتكاز، وبالتالي تواجه نوعاً مختلفاً من الحركة. الحركة حول نقطة ثابتة (والتي تمنع الانتقال) تسمى حركة دورانية. تواجه عقارب الساعة حركة دورانية أثناء التفافها في دائرة.

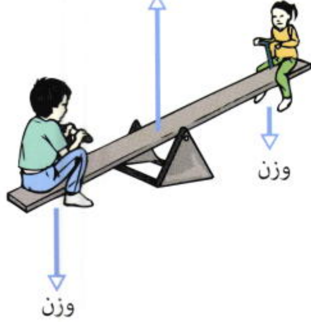
الحركة الدورانية هي التي تجعل لعبة الميزان مثيرة للاهتمام. النقطة المحورية للعبة الميزان هي أنها يمكنها أن تدور حتى يرتفع طفل والآخر يهبط. (قد لا تعتقد أن الارتفاع والانخفاض هو دوران، ولكن إذا لم تكن الأرض موجودة فإن الأرجوحة ستقدر أن تدور في دائرة كبيرة.) ما الذي يجعل لعبة الميزان تدور، وما الملاحظات التي يمكن أن نتوصل لها عن عملية الدوران؟
للإجابة على تلك الأسئلة، سنحتاج أن ندرس العديد من الكميات الفيزيائية المرتبطة بالدوران ونستكشف قوانين الحركة الدورانية التي تربطها مع بعض. سنقوم بهذه الأشياء عن طريق كلٍّ من دراسة عمل لعبة الميزان وأجسام دورانية أخرى وبالنظر إلى التشابه بين الحركة الانتقالية والحركة الدورانية.

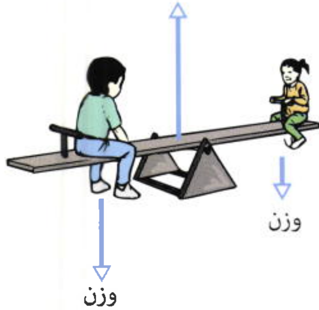
تخيل أنك تـُمسك بلعبة الميزان الموضحة في شكل (١,١,٢ أ) لتحافظ عليها في وضع مستوٍ للحظة بينما ينزل الطفل الذي على اليسار من اللعبة. الآن تخيّل تركك للعبة الميزان. حالما تتركها ستبدأ لعبة الميزان بالدوران، والطفل الذي على اليمين سيهبط باتجاه الأرض. حركة لعبة الميزان ستكون بطيئة بعض الشيء في البداية، ولكنها ستتحرك أسرع وأسرع إلى أن يصطدم ذاك الطفل بالأرض بصدمة تُجلجِل الأسنان.

إذا ركّزنا فقط على الدوران ذاته، يمكننا أن نصف حركة لعبة الميزان بالطريقة التالية:

«لا تدور لعبة الميزان إطلاقا في بادئ الأمر. عندما نترك لعبة الميزان فإنها تبدأ بالدوران باتجاه عقارب الساعة. يتزايد معدل دوران لعبة الميزان بثبات باتجاه عقارب الساعة حتى لحظة اصطدام الأرجوحة بالأرض.»







شكل ١,١,٢: (أ) عندما يجلس طفلان لهما نفس الوزن على طرفي لعبة الميزان فإنها تتوازن. (ب) عندما لا يتساوى وزناهما فإن الطفل الثقيل يهبط. (ج) إذا اقترب الطفل الثقيل من نقطة الارتكاز فإن لعبة الميزان يمكنها أن تتوازن.

هذا الوصف يشبه كثيرا وصف كرة ساقطة من السكون:

«لا تتحرك الكرة إطلاقاً في بادئ الأمر. عندما نترك الكرة فإنها تبدأ بالحركة للأسفل. يتزايد معدل انتقال الكرة بثبات في الاتجاه الأسفل حتى لحظة اصطدام الكرة بالأرض.»

العبارة الخاصة بلعبة الميزان تتضمن الحركة الدورانية، بينما العبارة الخاصة بالكرة تتضمن الحركة الانتقالية. التشابه بينهما ليس بمحض الصدفة؛ فمفاهيم وقوانين الحركة الدورانية لها العديد من المتناظرات في مفاهيم وقوانين الحركة الانتقالية. إن المعرفة التي قمنا باكتسابها من الحركة الانتقالية ستساعدنا في دراسة الحركة الدورانية.

تحقق من فهمك #١ : عجلة بسكويتات الحظ (للإجابة ، انظر صفحة ٧١)

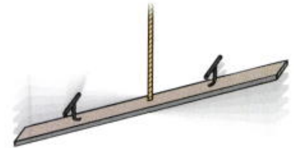
الضيوف الذين يجلسون حول طاولة كبيرة في مطعم صيني يستخدمون صينية قابلة للدوران (تسمى سوزان الكسولة)، ليتشاركوا في أطباق الطعام. كيف تختلف حركة هذه الصينية عن حركة عربة الحلويات المتنقلة؟

حركة لعبة ميزان متدلية

في الفصل السابق، تعرضنا لمفهوم القصور الذاتي الانتقالي، والذي ينص على أن الجسم المتحرك يميل للبقاء متحركا والجسم الساكن يميل للبقاء ساكنا. هذا المفهوم قادنا لقانون نيوتن الأول للحركة الانتقالية. إدخال كلمة «انتقالية» هنا هو مراجعة مفيدة لأننا على وشك التعرض لمفاهيم متشابهة مرتبطة بالحركة الدورانية. سوف نبدأ ذلك التعرض بملاحظة لعبة ميزان غير خاضعة لأي مؤثرات دورانية خارجية. بعد ذلك سندرس كيفية استجابة لعبة الميزان للمؤثرات الخارجية مثل نقطة ارتكازها أو عدد من الركاب الصغار. بسبب التشابه بين الحركتين الدورانية والانتقالية، فهذا القسم سيوازي بقرب دراستنا السابقة للتزلج والكرات الساقطة.

لنفترض أن لعبة ميزان جديدة تُركّب في ساحة اللعب في منطقتك وأن هذه اللعبة متدلية من حبل في الوقت الحالي. الحبل مربوط بمنتصف لعبة الميزان بطريقة ما بحيث أنه يدعم وزن اللعبة ولكنه لا يُحدث أي أثر آخر عليها. والنقطة الأكثر أهمية، لنفترض أن لعبة الميزان المتدلية يمكنها أن تدور وتتمحور بحرية كاملة - لا شيء يدفعها أو يديرها - وأن الحبل لا يتشابك أو يعترض الحركة (شكل ٢،١،٢). لعبة الميزان المتدلية لها الحرية الكاملة للفّ في أي اتجاه، حتى للانقلاب رأسا على عقب. أنت، المشاهد، تقف ساكنا بالقرب من لعبة الميزان. عندما تنظر إلى اللعبة، ما الذي تفعله لعبة الميزان؟

إذا كانت لعبة الميزان ساكنة، فإنها ستظل ساكنة. ولكن إذا كانت تدور فإنها ستستمر في الدوران بمعدل ثابت، حول خط ثابت في الفضاء. ما الذي يُبقي لعبة الميزان في حالة دوران؟ هو قصورها الذاتي الدوراني. الجسم الذي في حالة دوران يميل للبقاء في حالة دوران؛ الجسم الذي لا يدور يميل للبقاء في حالة عدم دوران. هكذا يعمل كوننا.

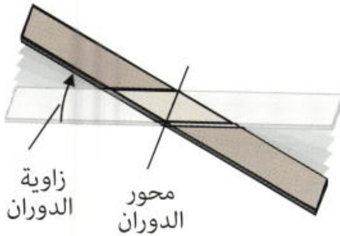


شكل ٢،١،٢ : لعبة ميزان متدلية من حبل مربوط بمنتصفها. بما أنه لا يوجد شيء يقوم بلفها، فإن لعبة الميزان تدور بثبات حول خط ثابت في الفضاء.

لوصف القصور الذاتي الدوراني للعبة الميزان والحركة الدورانية بدقة أكثر، سنحتاج لتعريف عدد من الكميات الفيزيائية المرتبطة بالحركة الدورانية. الأولى هي اتجاه لعبة الميزان. في أي لحظة معينة، تتخذ لعبة الميزان اتجاهاً معيناً - أي أن لها موقعاً زاوياً. الموقع الزاوي يصف اتجاه لعبة الميزان بالنسبة لاتجاه مرجعي معين؛ ويمكن تعيينه بتحديد لأي درجة دارت لعبة الميزان بعيدا عن اتجاهها المرجعي والمحور أو الخط الذي حدث

الدوران حوله. الموقع الزاوي للعبة الميزان هو كمية متجهة ذات أهمية بسيطة نسبيا، تشير على طول محور الدوران بمقدار مساوٍ لزاوية الدوران (شكل ٣،١،٢).

وحدة الموقع الزاوي في النظام العالمي هي الراديان، الوحدة الطبيعية للزوايا. هي وحدة طبيعية لأنها تأتي مباشرة من الهندسة، وليس من اختيار بشري عشوائي أو اتفاقية جماعية مثل ما هو حاصل في معظم الوحدات. تخبرنا الهندسة أن الدائرة ذات نصف قطر مقداره 1، لها محيط يساوي 2π. إذا جعلنا الأقواس حول محيط تلك الدائرة هي التي تحدد الزوايا، فإننا نستخدم الراديان. على سبيل المثال، يوجد 2π راديان (أو 360^o) في دائرة كاملة و $\pi/2$ راديان (أو90^o) في زاوية قائمة. ولأن الراديان وحدة طبيعية فإنها تحذف في الغالب من الحسابات والوحدات المشتقة.



شكل ٣،١،٢: يمكنك أن تحدد الموقع الزاوي للعبة الميزان هذه، بالنسبة لاتجاهها المرجعي الأفقي، بالمحور الذي تدور حوله لتصل لاتجاهها الجديد والزاوية التي قطعتها خلال الدوران.

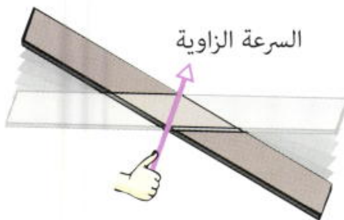
إذا كانت لعبة الميزان تدور، فإن موقعها الزاوي يتغير؛ بعبارة أخرى، لها سرعة زاوية. السرعة الزاوية هي أول كمياتنا المتجهة المهمة للحركة الدورانية وتقيس معدل تغير الموقع الزاوي للعبة الميزان؛ وهي تشمل مقدار السرعة الزاوية التي تدور بها لعبة الميزان والمحور الذي يحدث حوله ذلك الدوران. مقدار السرعة الزاوية هو التغير في الزاوية مقسوما على الزمن اللازم لذلك التغير:

$$\text{مقدار السرعة الزاوية} = \frac{\text{التغير في الزاوية}}{\text{الزمن}}$$

وحدة السرعة الزاوية في النظام العالمي هي راديان-لكل-ثانية (تختصر $1/s$).

محور دوران لعبة الميزان هو الخط في الفضاء الذي تدور حوله اللعبة. ولكن معرفة هذا الخط فقط ليست كافية تماما: هل لعبة الميزان تدور في اتجاه عقارب الساعة أم عكس عقارب الساعة؟

لحل هذا الغموض، نستفيد من حقيقة أن أي خط له اتجاهان. ما أن نحدد الخط الذي تدور حوله لعبة الميزان، نستطيع أن ننظر للعبة على طول ذلك الخط من أي من الاتجاهين. من اتجاه واحد، تبدو لعبة الميزان أنها تدور باتجاه عقارب الساعة؛ من الاتجاه الآخر، عكس عقارب الساعة. بالاتفاق، سنختار الاتجاه الذي يبدو فيه أن لعبة الميزان تدور باتجاه عقارب الساعة ونقول أن محور دوران اللعبة يشير بعيدا عن عيننا باتجاه لعبة الميزان. تسمى هذه الاتفاقية بقاعدة اليد اليمنى لأنه إذا كانت أصابع يدك اليمنى تلتف حول المحور مثل اتجاه التفاف لعبة الميزان، فيشير إبهامك على طول محور دوران لعبة الميزان (شكل ٤،١،٢).



شكل ٤،١،٢: تدور لعبة الميزان هذه حول محور الدوران الموضح. يُحدَّد اتجاه السرعة الزاوية للعبة الميزان باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

تذكر أن هذه الاتفاقية ليست مهمة كأهمية فهم لماذا يجب علينا أن نحدد الاتجاه الذي يحدث حوله الدوران، عند وصف السرعة الزاوية لجسم في حالة دوران. فمثلما أن السرعة الانتقالية تشتمل على مقدار للسرعة الانتقالية واتجاه حدوث الحركة الانتقالية، كذلك السرعة الزاوية تشتمل على مقدار السرعة الزاوية واتجاه تحدث حوله الحركة الدورانية.

نحن الآن على استعداد لوصف الحركة الدورانية للعبة الميزان المتدلية. بما أن لعبة الميزان غير خاضعة لمؤثرات خارجية وبسبب قصورها الذاتي الدوراني، فإن سرعتها الزاوية ثابتة. لعبة الميزان المتدلية ستستمر وتستمر في الدوران، دائما بنفس السرعة الزاوية، ودائما حول نفس محور الدوران.

كما قد تظن، هذه الملاحظة ليست فريدة للعبة الميزان. إنها قانون نيوتن الأول للحركة الدورانية، والذي ينص على أن الجسم الصلب غير المترنح وغير الخاضع لمؤثرات خارجية يدور بسرعة زاوية ثابتة، فيلف بكميات متساوية في فترات زمنية متساوية حول محور دوران مثبت. إن المؤثرات الخارجية المُشار لها في هذا القانون

تسمى عزم الدوران – مصطلح تقني للـّف والدوران. عندما تقوم بلف غطاء لفكه من قنينة أو تقوم بتدوير مغزل بأصابعك فأنت تبذل عزماً دورانياً.

يستثني هذا القانون الأجسام التي ترتنح أو التي يمكن أن يتغير شكلها نتيجة الدوران لأن تلك الأجسام لها حركات أكثر تعقيدا. بدلاً من ذلك، يتم التعامل مع هذه الأجسام بمبدأ أكثر شمولية – حفظ كمية الحركة الزاوية – الذي سنتعلمه لاحقا.

قانون نيوتن الأول للحركة الدورانية

الجسم الصلب غير المترنح وغير الخاضع لأي عزم دوراني خارجي يدور بسرعة زاوية ثابتة، فيلف بكميات متساوية في فترات زمنية متساوية حول محور دوران مثبت.

تحقق من فهمك # ٢: أخذ لفة (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

تطفو كرة سلة مطاطية في مسبح. تواجه الكرة عزماً دورانياً مساوياً للصفر، بغض النظر عن أي جزء منها كان للأعلى. إذا قمت بلف كرة السلة ثم تركتها، كيف ستتحرك؟

مركز كتلة لعبة الميزان

حتى بدون زيارة ساحة اللعب، تستطيع أن تجد العديد من الأجسام الحرة تقريباً من العزوم الدورانية: العصا المقذوفة للأعلى بعد لفها من قبل لاعب الاستعراض، مثلاً، أو مضرب البهلوان وهو يلتف في الهواء أثناء تنقله بين المهرجَين. ومع ذلك تعد هذه الحركات معقدة لأن تلك الأجسام المتحركة بحرية تدور وتنتقل في نفس الوقت. فالعصا التي تلف تتحرك للأعلى وللأسفل، والمضرب الذي يدور يتخذ مسار حركة مقوساً في الهواء، وإذا انقطع حبل أرجوحتنا فإنها ستسقط وهي تدور. كيف يمكن أن نميز حركاتهم الانتقالية من حركاتهم الدورانية؟



شكل ٥،١،٢ : يدور هذا المضرب حول مركز كتلته، والذي يظل ساكنا.

مرة أخرى، يمكننا أن نستفيد من تبسيط جميل في الفيزياء. توجد نقطة مميزة داخل أو قريبة من الجسم الحر والتي تتوازن حولها كل كتلة الجسم بانتظام والتي حولها يدور الجسم طبيعياً – هي مركز الكتلة. يمر محور الدوران خلال هذه النقطة بحيث - عند دوران الجسم الحر - لا يتحرك مركز الكتلة إلا إذا كان للجسم إجمالا سرعة انتقالية. إن مركز الكتلة لكرة اعتيادية هو مركزها الهندسي، بينما يعتمد مركز كتلة جسم غير متناظر على كيفية توزيع الكتلة في ذلك الجسم. يمكنك أن تبدأ في إيجاد مركز كتلة جسم صغير عن طريق لفه على سطح طاولة ملساء والبحث عن النقطة الثابتة التي يدور حولها (شكل ٥،١،٢).



شكل ٦،١،٢: مضرب بهلوان يتحرك خلال الفضاء، يدور حول مركز كتلته بينما يتحرك مركز كتلته وفق المسار المقوس البسيط المرتبط بالجسم الساقط.

مركز الكتلة يمكّننا من فصل حركة الجسم الانتقالية من حركته الدورانية. فبينما يتحرك مضرب البهلوان بشكل مقوس في الهواء، فإن مركز كتلته يتبع المسار البسيط الذي ناقشناه في قسم ١-٢ عن الكرات الساقطة (شكل ٦،١،٢). في نفس الوقت، الحركة الدورانية للمضرب حول مركز كتلته هي حركة جسم غير خاضع لعزوم دورانية خارجية: إذا لم يكن يترنح، فإنه سيدور بسرعة زاوية ثابتة.

خلال هذا الكتاب سنواجه العديد من الأجسام التي تنتقل وتدور بشكل آني، ومن المفيد أن نتذكّر أنه يمكننا في الغالب فصل هاتين الحركتين بالانتباه إلى مركز كتلة الجسم. على سبيل المثال، العمّال الذين يقومون بنصب لعبة الميزان سيحددون مركز ارتكازها بعناية عند مركز كتلتها أو قريباً جدا منه. نتيجة لذلك، فإن

نقطة الارتكاز ستمنع حدوث أي حركة انتقالية للعبة الميزان بينما ستسمح لها بحركة دورانية حرة تقريبا حول مركز كتلتها، على الأقل حول محور واحد.

تحقق من فهمك # ٣: متابعة الغطس العالي (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

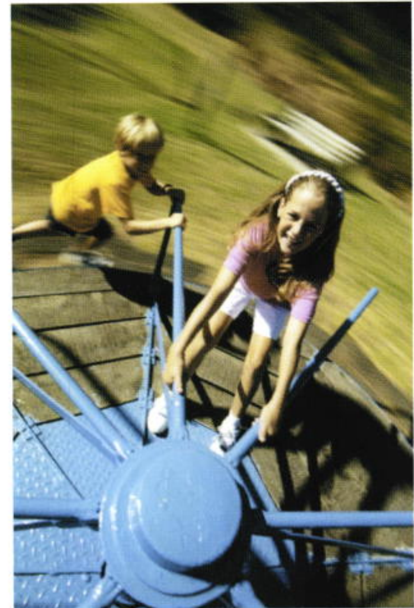
عندما يقوم غطّاس بشقلبة مفتوحة ومتصلبة من فوق لوحة قفز عالية، تبدو حركته معقدة جدا. هل يمكن وصف هذه الحركة بصورة بسيطة؟ كيف؟

كيف تستجيب لعبة الميزان لعزوم الدوران

العمّال يتناولون غداءهم، لذا فإن لعبة الميزان مازالت متدلية من الحبل. لماذا لا تستطيع هذه اللعبة المتدلية تغيير مقدار سرعتها الدورانية أو محور دورانها؟ لأن لها كتلة دورانية (انظر٥[١]) . الكتلة الدورانية هي مقياس للقصور الذاتي الدوراني للجسم، مقاومته لتغيير سرعته الزاوية. الكتلة الدورانية للجسم تعتمد على كلٍّ من كتلته الاعتيادية وعلى كيفية توزيع تلك الكتلة داخل الجسم. وحدة الكتلة الدورانية في النظام العالمي للوحدات SI هي كيلوجرام.متر^2 (اختصارا $kg{\cdot}m^2$). بما أن لعبة الميزان لها كتلة دورانية، فإن سرعتها الزاوية ستتغير فقط إذا قام شيء ما بلفـّها أو تدويرها. بعبارة أخرى، يجب أن تخضع لعزم دوراني.

عزم الدوران – ثاني كمياتنا المتجهة المهمة في الحركة الدورانية – له كلٌّ من مقدار واتجاه. كلما بذلت عزماً دورانياً أكبر على لعبة الميزان، تغيرت سرعتها الزاوية بشكل أسرع. اعتمادا على اتجاه العزم الدوراني، فإنه يمكنك جعل لعبة الميزان تدور بسرعة أكبر أو بسرعة أقل أو حتى تدور حول محور دوران آخر. ولكن كيف تحدد اتجاه عزم دوراني معيّن؟ إحدى الطرق أن تتخيل أنك تبذل هذا العزم الدوراني على كرة ساكنة تطفو فوق الماء (شكل ٧,١,٢ أ، ب). ستبدأ الكرة بالدوران، وتكتسب سرعة زاوية غير صفرية (شكل ٧,١,٢ ج). اتجاه هذه السرعة الزاوية هو نفسه اتجاه عزم الدوران. وحدة عزم الدوران في النظام العالمي للوحدات SI هي نيوتن.متر (اختصارا $N{\cdot}m$).

٥[١] للتوضيح والتبسيط، يشير هذا الكتاب لقياس القصور الذاتي الدوراني لجسم بـ "الكتلة الدورانية". بينما تعرف هذه الكمية رسميا بـ "عزم القصور الذاتي".



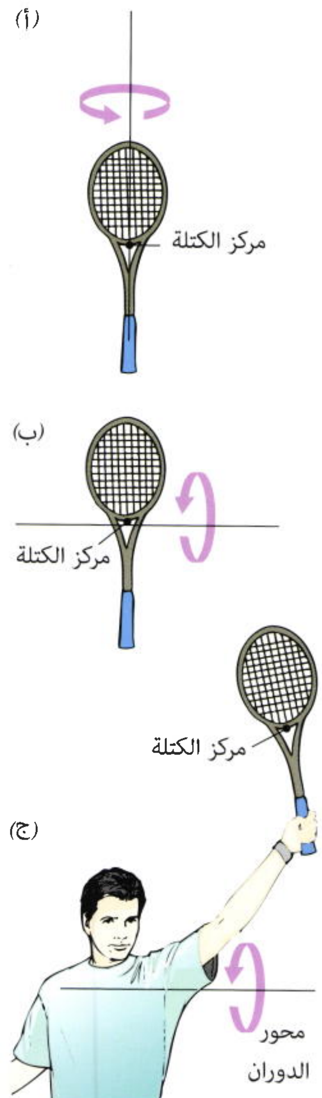
شكل ٨,١,٢: من الصعب تدوير لعبة الدوّامة (mer-ry-go-round) لأن لها كتلة دورانية كبيرة. على الرغم من عزم الدوران الكبير الذي يبذله هذا الطفل، فإن سرعة الدوّامة الزاوية تتزايد ببطء.



شكل ٧,١,٢: إذا بدأت بكرة لا تدور (أ) ثم لفقتها بعزم دوراني (ب)، ستكتسب الكرة سرعة زاوية (ج) والتي لها نفس اتجاه ذلك العزم الدوراني.

كلما كبرت كتلة الجسم الدورانية، تغيرت سرعتها الزاوية استجابة لعزم دوراني معيّن بصورة أبطأ (شكل ٨،١،٢). فيمكنك بسهولة لف كرة سلة بأطراف أصابعك، ولكن لف كرة بولنج أصعب بكثير. إن السبب الرئيسي لكتلة كرة البولنج الدورانية الأكبر هو أن كتلتها الاعتيادية أكبر من كتلة كرة السلة.

لكن الكتلة الدورانية تعتمد أيضا على شكل الجسم، خصوصاً على مقدار بعد كل جزء من الكتلة الاعتيادية عن محور الدوران. فكلما كان جزء من الكتلة بعيدا عن ذاك المحور، لزم عليه التسارع بمعدل أكبر عندما يخضع الجسم كله لتسارع زاوي، وزادت قوة رفعه التي بها يعارض ذاك التسارع. سندرس الروافع قريبا، ولكن نتيجة هذين التأثيرين للبعد عن محور الدوران هي أن كل جزء من الكتلة يساهم في الكتلة الدورانية للجسم بالتناسب مع مربع بُعد هذا الجزء عن ذلك المحور. لذلك فإن الجسم الذي يكون معظم كتلته موجود بالقرب من محور الدوران سيكون له كتلة دورانية أصغر كثيراً من جسم له نفس الكتلة الاعتيادية ولكن معظم هذه الكتلة موجود بعيدا عن ذلك المحور. هكذا، فإن عجينة البيتزا الدائرية لها كتلة دورانية أقل من قرص البيتزا النهائي. وكلما كبر قرص البيتزا ازدادت صعوبة بدء دورانه أو إيقاف هذا الدوران.



شكل ٩،١،٢: الكتلة الدورانية لمضرب التنس تعتمد على المحور الذي يدور حوله. تكون كتلته الدورانية صغيرة (أ) عندما يدور حول مقبضه وكبيرة (ب) عندما يدور رأسه على مقبضه. (ج) إذا جعلته يدور حول كتفك، ستصبح كتلته الدورانية أكبر **بكثير**.

بما أن الكتلة الدورانية لجسم تعتمد على بُعد كتلته عن محور الدوران، فإن من المحتمل أن تغييرات في محور الدوران ستغير من الكتلة الدورانية للجسم. على سبيل المثال، تدوير مضرب كرة المضرب (التنس) حول مقبضه يتطلب عزماً دورانياً أقل من قلبه رأسه على مقبضه (شكل ٩،١،٢ ب). عندما تقوم بتدوير مضرب التنس حول مقبضه فإن محور دورانه يمر خلال المقبض بحيث يكون معظم كتلته قريباً نسبيا من المحور وكتلته الدورانية تكون صغيرة. عندما تقلب مضرب التنس رأسه على مقبضه، فإن محور الدوران يمر عبر المقبض فيكون كلٌّ من الرأس والمقبض بعيدَين عن المحور والكتلة الدورانية تكون كبيرة. ستصبح كتلة مضرب التنس الدورانية أكبر بكثير عندما تمسك به بيدك وتجعله يدور حول كتفك بدلا من مركز كتلته (شكل ٩،١،٢ ج).

عندما يؤثر شيء ما بعزم دوراني على لعبة الميزان المتدلية، فإن سرعتها الزاوية تتغير؛ بعبارة أخرى، ستخضع لتسارع زاوي، وهو ثالث كمياتنا المتجهة المهمة في الحركة الدورانية. التسارع الزاوي يقيس سرعة تغير سرعة لعبة الميزان الزاوية. وهو مماثل للتسارع، والذي يقيس سرعة تغير سرعة الجسم الانتقالية. كما هو في التسارع، فإن التسارع الزاوي يتضمن كلا من مقدار واتجاه. يخضع الجسم لتسارع زاوي عندما تزيد أو تنقص سرعته الزاوية أو عندما يتغير اتجاه سرعته الزاوية. وحدة التسارع الزاوي في النظام العالمي للوحدات SI هي راديان-لكل-ثانية^2 (اختصارا $1/s^2$).

هناك علاقة بسيطة بين عزم الدوران المبذول على لعبة الميزان، وكتلتها الدورانية، وتسارعها الزاوي. فالتسارع الزاوي للعبة الميزان يساوي العزم الزاوي المبذول عليها مقسوما على كتلتها الدورانية، أو كمعادلة لفظية،

$$\text{السرعة الزاوية} = \frac{\text{العزم الزاوي}}{\text{الكتلة الدورانية}} \qquad (١،١،٢)$$

كما رأينا سابقا، فإن اتجاه التسارع الزاوي للعبة الميزان هو نفس اتجاه عزم الدوران المبذول عليها. هذه العلاقة هي قانون نيوتن الثاني للحركة الدورانية. إن ترتيب العلاقة بهذا الشكل يميز بين الأسباب (العزم الدوراني والكتلة الدورانية) وتأثيراتها (التسارع الزاوي). مع هذا، فإنه أصبح من المعتاد إعادة ترتيب العلاقة للتخلص من عملية القسمة. ففي شكلها التقليدي، يمكن كتابة هذه العلاقة لفظيا بالمعادلة:

$$\text{العزم الدوراني} = \text{الكتلة الدورانية} \times \text{التسارع الزاوي} \qquad (٢،١،٢)$$

ورمزيا: $\tau = I \, . \, \alpha$

وفي لغة الحياة اليومية: تدوير كرة باراجون أسهل بكثير من تدوير لعبة دوّامة الخيل *(Merry -go -round)*.

تشابه العلاقة قانون نيوتن الثاني للحركة الانتقالية (القوة = الكتلة · التسارع)، إلا أن القوة استُبدلت بالعزم الدوراني، والكتلة استُبدلت بالكتلة الدورانية، والتسارع استُبدل بالتسارع الزاوي. لا ينطبق هذا القانون الجديد على الأجسام المترنحة لوجود أكثر من كتلة دورانية واحدة تؤثر عليها بشكل آني (انظر مناقشة مضرب التنس أعلاه) وتتبع قانونا أكثر تعقيدا.

قانون نيوتن الثاني للحركة الدورانية

العزم الدوراني المبذول على جسم غير مترنح يساوي حاصل ضرب كتلة ذلك الجسم الدورانية في تسارعه الزاوي. يشير التسارع الزاوي في نفس اتجاه العزم الدوراني.

لأنها معادلة، فإن طرفي المعادلة (١,١,٢) متساويان. أي تغير في عزم الدوران الذي تبذله على لعبة الميزان يجب أن يرافقه تغير متناسب في تسارعها الزاوي. نتيجة لذلك، كلما قمت بلف أو تدوير لعبة الميزان بقدر أكبر، زاد معدل تغير سرعتها الزاوية.

يمكننا أيضاً أن نقارن بين تأثير عزم زاوي معين على كتلتين دورانيتين مختلفتين. معادلة (١,١,٢) توضح أن التناقص في الكتلة الدورانية يجب أن يرافقه زيادة متماثلة في التسارع الزاوي. إذا استبدلنا لعبة ميزان ساحة اللعب بلعبة ميزان دمية، ستقل الكتلة الدورانية ويزيد التسارع الزاوي. وبالتالي تتغير السرعة الزاوية للعبة ميزان دمية بمعدل أكبر من تغير السرعة الزاوية للعبة ميزان ساحة اللعب عندما يتعرضان لعزم دوراني متماثل.

الخلاصة:

١. موقعك الزاوي يحدد اتجاهك بالضبط.
٢. سرعتك الزاوية تقيس سرعة تغير موقعك الزاوي.
٣. تسارعك الزاوي يقيس سرعة تغير سرعتك الزاوية.
٤. لكي تخضع لتسارع زاوي، لا بد أن يبذل شيء ما عزماً دورانياً عليك.
٥. كلما كانت لديك كتلة دورانية أكبر، تعرضت لتسارع زاوي أقل في وجود عزم دوراني معين.

الكمية	وحدة النظام العالمي *SI*	وحدة النظام البريطاني	*SI* ← النظام البريطاني	النظام البريطاني ← *SI*
الموقع الزاوي	Radian (1)	Radian (1)		
السرعة الزاوية	Radian -per-second (/1)	Radian -per-second (1/s)		
التسارع الزاوي	Radian -per-second^2 (1/s^2)	Radian -per-second^2 (1/s^2)		
عزم الدوران	Newton -meter (N·m)	Foot-pound (ft·lbf)	1N·m = 0.73757 ft·lbf	1ft·lbf = 1.3558 N·m
الكتلة الدورانية	Kilogram -meter^2 (kg·m^2)	Pound -foot^2 (lbm·ft^2)	1kg·m^2 = 23.730 lbm·ft^2	1lbm·ft^2 = 0.042140 kg·m^2

هذا الملخص للكميات الفيزيائية الخاصة بالحركة الدورانية تماثل الملخص الخاص بالحركة الانتقالية الوارد سابقًا. خذ بعضاً من الوقت للمقارنة بين الاثنين.

تحقق من فهمك #٤ : لعبة دوّامة (merry-go-round) (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

الدوّامة هي لعبة شعبية في ساحة اللعب (انظر شكل ٨،١،٢). في حين تدويرها وهي فارغة صعب، فإن البدء بتدوير الدوامة أو إيقافها عندما تمتلئ بأطفال كثيرين يكون أصعب. لماذا يصعب تغيير السرعة الزاوية للدوامة الممتلئة؟

دقق في أرقامك #١ : صعب اللف (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

في العادة تكون إطارات السيارة مجوفة ومليئة بالهواء. إذا كانت مصنوعة من المطاط ومصمتة، فإن كتلهم الدورانية ستكون أكبر بـ 10 أضعاف. برفع الإطار عن الأرض، ما مقدار الزيادة في عزم الدوران والذي يجب أن تبذله السيارة على إطار مصمت لجعله يخضع لتسارع زاوي مماثل لإطار مجوف؟

قوى، وعزوم دوران، وألعاب ميزان

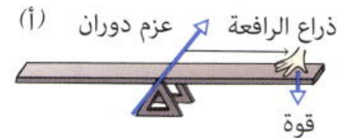
وأخيرا، قام العمّال بتركيب لعبة الميزان. لقد قاموا بتركيبها على مرتكز يمر مباشرة بمركز كتلتها، بحيث تتطابق نقطة الارتكاز مع محور دوراني طبيعي للعبة الميزان. بذلك يكون المرتكز داعما وزن لعبة الميزان بينما يترك لها الحرية لتمتثل لقانون نيوتن الأول للحركة الدورانية. أي أن لعبة الميزان غير المأهولة تدور بسرعة زاوية ثابتة حول نقطة ارتكازها.

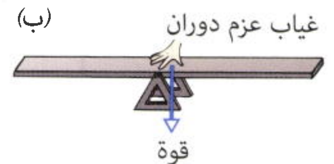
لعبة الميزان غير المأهولة متوازنة، أي أن عزم الدوران المبذول عليها صفر. نتيجة لذلك، فهي لا تعاني من أي تسارع زاوي. قد تظن أن لعبة الميزان المتوازنة تظل دائما في وضع أفقي، ولكن ذلك ليس بالضرورة. ما هو مؤكد هو أن سرعتها الزاوية ثابتة. إذا كانت تدور، فإنها ستستمر في الدوران بثبات حول نقطة الارتكاز؛ إذا كانت ساكنة، فإنها ستظل في حالة سكون في وضع ميلها الذي هي عليه، سواء كان أفقيا أم لا.

لتغيير السرعة الزاوية للعبة الميزان، يجب أن تؤثر عليها بعزم دوراني. ولكن كيف بالضبط تؤثر بعزم دوراني؟ تضع يدك على أحد طرفي لعبة الميزان وتدفع ذلك الطرف للأسفل (شكل ١٠،١،٢ أ). ستبدأ لعبة الميزان بالدوران، وما هو إلا وقت قصير ويصطدم طرفك بالأرض. قد أثرت بعزم دوراني على لعبة الميزان.

ولكن بدأت عن طريق بذل قوة على لعبة الميزان – أنت قمت بدفعها – لذلك فإن القوى وعزوم الدوران يجب أن تكون مترابطة بطريقة ما. بالتأكيد، يمكن للقوة أن تنتج عزماً دورانياً ويمكن لعزم الدوران أن ينتج قوة. لمساعدتنا في استكشاف تلك العلاقة، دعنا نفكّر في جميع الطرق التي لا نؤثر بها بعزم دوراني على لعبة الميزان.

ماذا يحدث إذا قمت بدفع لعبة الميزان بالضبط عند الموضع الذي تمر من خلاله نقطة الارتكاز (شكل ١٠،١،٢ ب)؟ لا شيء – لا يحدث تسارع زاوي. إذا ابتعدت قليلا عن نقطة الارتكاز، فإنه يمكنك جعل لعبة الميزان تدور ولكن ستحتاج للدفع بشدة. ستستطيع أن تعمل بشكل أفضل بدفعك طرف لعبة الميزان، حيث إن مجرد بذل قوة صغيرة يمكنه أن يجعل اللعبة تبدأ بالدوران. المسافة بين نقطة الارتكاز والموضع الذي تقوم بالدفع عنده على لعبة الميزان يسمى ذراع الرافعة؛ بصفة عامة، كلما زاد طول ذراع الرافعة، تطلب قوة أقل لإحداث تسارع زاوي معيّن. ملاحظتنا الأولى حول إحداث عزم دوراني عن طريق القوة هي: ستحصل على زيادة في العزم دوراني عن طريق بذل تلك القوة بعيدا عن نقطة الارتكاز أو محور الدوران. بعبارة أخرى، العزم الدوراني يتناسب مع ذراع الرافعة.







شكل ١٠،١،٢ : (أ) عندما تدفع لعبة الميزان للأسفل، بعيدا عن نقطة الارتكاز، فأنت تبذل عزماً دورانياً عليها. ولكن عندما (ب) تبذل قوة عند نقطة الارتكاز أو (ج) تبذل قوة باتجاه نقطة الارتكاز، فأنت لا تبذل أي عزم دوراني.

طريقة أخرى غير مؤثرة لجعل لعبة الميزان تبدأ بالدوران هي دفع أطرافها باتجاه أو بعيدا عن نقطة الارتكاز مباشرة (شكل ١٠،١،٢ ج). القوة المبذولة باتجاه محور الدوران أو بعيداً عنه لا تحدث أي عزم دوراني حول ذلك المحور. يجب على الأقل أن تكون هناك مركبة للقوة التي تبذلها عمودية على ذراع الرافعة، والذي هو في الحقيقة متجه يشير على طول سطح لعبة الميزان ابتداء من نقطة الارتكاز إلى الموضع الذي تدفع عنده اللعبة. ملاحظتنا الثانية حول إحداث عزم دوراني عن طريق قوة هي أنه يجب أن تبذل على الأقل مركبة من تلك القوة تكون عمودية على ذراع الرافعة. تلك المركبة فقط هي التي تساهم في العزم الدوراني. لإحداث أكبر عزم دوراني، ادفع عمودياً على ذراع الرافعة.

يمكننا تلخيص هاتين الملاحظتين كالتالي: العزم الدوراني الناتج عن قوة يساوي حاصل ضرب ذراع الرافعة بتلك القوة، حيث نشمل فقط مركبة القوة التي تكون عمودية على ذراع الرافعة. هذه العلاقة يمكن أن تكتب على شكل معادلة لفظية:

العزم الدوراني = ذراع الرافعة × القوة العمودية على ذراع الرافعة (٣،١،٢)

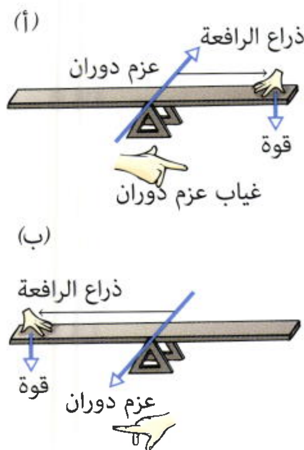
ورمزيا:

$$\tau = r \, . \, F\perp$$

وفي لغة الحياة اليومية: عند لف جسم صلب، سييسر الأمر استخدام عصا طويلة.

إن اتجاهات القوة وذراع الرافعة تحدد أيضا اتجاه عزم الدوران. هذه الاتجاهات الثلاثة تتبع قاعدة يد يمنى أخرى (شكل ١١،١،٢). إذا أشرت بسبابتك اليمنى باتجاه ذراع الرافعة وأصبعك الأوسط المنثني باتجاه القوة، عندها سيشير إبهامك في اتجاه عزم الدوران. إذن في الشكل (١١،١،٢ أ)، ذراع الرافعة يشير لليمين، والقوة تشير للأسفل، والعزم الدوراني الناتج يشير إلى داخل الصفحة بحيث تخضع الأرجوحة لتسارع زاوي في اتجاه عقارب الساعة. في الشكل (١١،١،٢ ب)، انعكس اتجاه ذراع الرافعة وكذلك العزم الدوراني.

ماذا يحدث إذا قمت أنت وصديقك بالدفع على المقعدين للأسفل بشكل آني؟ عندها ستنتجان عزمين دورانيين على لعبة الميزان حول نقطة ارتكازها، وهذان العزمان الدورانيان لهما اتجاهان متعاكسان. ستستجيب لعبة الميزان لمحصلة العزوم الدورانية التي تؤثر عليها، أي لمجموع كل العزوم الدورانية المنفردة المبذولة عليها. بما أن عزميكما الدورانيين متعاكسان في الاتجاه، فإنهما سيلغيان بعضهما جزئيا على الأقل. إذا بذلتما بعناية قوتين متماثلتين متجهة للأسفل على بعدين متماثلين من نقطة الارتكاز، فإن مقدار العزمين الدورانيين سيكونان متساويين تماما ومجموعهما صفر. ستتعرض لعبة الميزان لمحصلة عزوم دورانية مقدارها صفر، وستتوازن.



شكل ١١،١،٢ : يتبع العزم الدوراني على لعبة ميزان قاعدة اليد اليمنى: إذا أشارت سبابتك باتجاه ذراع الرافعة وأشار أصبعك الأوسط باتجاه القوة، عندها سيشير إبهامك في اتجاه عزم الدوران.

هذه الملاحظة توضح الحاجة للحذر عند جلوس الأطفال على لعبة الميزان. وزن كل طفل يؤثر بقوة للأسفل على لعبة الميزان وبتوزيع هذه الأوزان بشكل صحيح على جانبي نقطة الارتكاز فإنه يمكن جعل مجموع العزوم الدورانية التي تحدثها مساوياً للصفر. بمحصلة عزم دوراني صفري حول نقطة الارتكاز، تتزن لعبة الميزان.

في الحقيقة، إن وزن لعبة الميزان ذاتها يتوازن بهذه الكيفية. فمع أن وزني طرفي لعبة الميزان يبذلان عزماً دورانياً على اللعبة، إلا أن مجموع هذين العزمين الدورانيين سيكون صفرا ولا يكون له أي تأثير إجمالي على دوران لعبة الميزان.

تحقق من فهمك #٥ : تقطيع الورق المقوّى (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

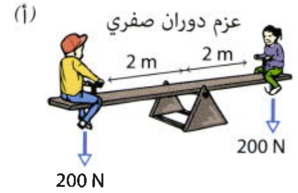
عندما تقطع ورقا مقوّى باستخدام مقصّ، من الأفضل أن تحرك الورق أقرب ما يمكن من نقطة ثبات المقص. وضح ذلك.

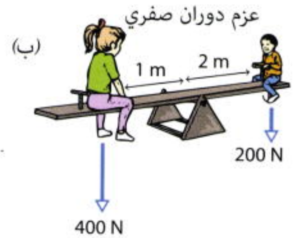
دقق في أرقامك # ٢: بضعة براغي مفكوكة (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

تحاول أن تزيل بعض البراغي الصدئة من ثلاجتك، باستعمال مفتاح قابل للتعديل له مقبض طوله 0.2m (20cm). بالرغم من دفعك على المقبض بأقصى قوة تقدر عليها، فإنك لا تستطيع إنتاج عزم دوراني كافٍ لفك أحد هذه البراغي. لديك أنبوب طوله 1m (100cm) يمكنك أن تدخل مقبض المفتاح فيه لجعل طول مقبض المفتاح فعليا 1 متر. ما المقدار الإضافي من العزم الدوراني الذي يمكنك الآن بذله على البرغي؟

محصلة العزم الدوراني والفائدة الميكانيكية

إن مقدار العزم الدوراني الذي يحدثه وزن طفلة على لعبة ميزان يعتمد على بُعد الطفلة عن نقطة الارتكاز، إذا جلست الطفلة على نقطة الارتكاز، فإن طول ذراع الرافعة يكون صفرا ولا تُحدث أي عزم دوراني؛ ولكن إذا جلست على أقصى طرف لعبة الميزان، فإن ذراع الرافعة يصبح طويلا، وتُحدث عزماً دورانياً كبيراً. يمكن للطفلة تعديل مقدار عزمها الدوراني بالتحرك على طول لعبة الميزان لأن اللعبة توفر لها فائدة ميكانيكية. كما رأينا في قسم ١-٣ ، تظهر الفائدة الميكانيكية عندما تقوم أداة بإعادة توزيع مقدار القوة والمسافة المستخدمة لإنتاج مقدار معيّن من الشغل. تسمح لعبة الميزان لقوة صغيرة تؤثر على طرفها بالقيام بنفس الشغل الذي تقوم به قوة كبيرة مبذولة بالقرب من نقطة الارتكاز.





شكل ١٢,١,٢: (أ) عندما يجلس طفلان لهما وزنان متساويان على بعدين متساويين من نقطة الارتكاز، فإنهما سيحدثان عزمين دورانيين متساويين ولكن متعاكسين حول نقطة الارتكاز. مجموع هذين العزمين سيكون صفراً، لذا فإن لعبة الميزان ستواجه محصلة عزم دوراني صفرية. (ب) عندما يكون وزن أحد الطفلين ضعف الطفل الآخر، فإن لعبة الميزان تتوازن عندما يجلس الطفل الثقيل عند نصف المسافة من نقطة الارتكاز.

لرؤية كيف تظهر الفائدة الميكانيكية في لعبة ميزان، فكّر فيما يحدث عندما يجلس طفلان على طرفيها. إذا جلس طفلان ذوا الخمس سنوات من العمر، وزن كل واحد منهما 200N (45lb) على طرفي لعبة الميزان وعلى بعد 2m (6.6ft) عن نقطة الارتكاز (شكل ١٢,١,٢ أ)، فإن كلا منهما يحدث عزماً دورانياً مقداره 400N·m (300ft·lbf) على لعبة الميزان حول نقطة ارتكازها (200N·2m = 400N·m). ولكن بما أن هذين العزمين الدورانيين في اتجاهين متعاكسين، فإن مجموعهما سيكون صفرا. محصلة العزم الدوراني على لعبة الميزان يساوي صفرا وتتوازن اللعبة.

إذا قمت باستبدال أحد هذين الطفلين ذوي الخمس سنوات بمراهق وزنه 400N (90lbf)، فإن على المراهق أن يجلس عند نصف المسافة من نقطة الارتكاز (شكل ١٢,١,٢ ب). مضاعفة القوة مع تنصيف ذراع الرافعة تترك عزم الدوران بدون تغيير عند القيمة 400N·m. مرة أخرى كلا الطفلين يُحدثان عزماً دورانياً متساوياً ولكن متعاكساً حول نقطة الارتكاز، وبالتالي محصلة العزم الدوراني على لعبة الميزان تساوي صفرا وتتوازن اللعبة. هذا التأثير يفسّر كيف يمكن لطفل صغير على طرف لعبة الميزان أن يوازن طفلاً كبيراً يجلس أقرب من نقطة الارتكاز.

مع توازن لعبة الميزان لا يتسارع شيء. كلا الطفلين يواجه محصلة قوة مقدارها صفر؛ تدفع لعبة الميزان الطفل الصغير للأعلى بقوة مقدارها 200N (45lbf) وتدفع الطفل الكبير بقوة مقدارها 400N (90lbf). في النهاية، وزن الطفل الصغير والذي مقداره 200N (45lbf) هو الذي يتسبب في وجود القوة الداعمة والتي مقدارها 400N (90lbf) التي يواجهها الطفل الكبير. الفائدة الميكانيكية للعبة الميزان تسمح للطفل الصغير أن يدعم ويرفع الطفل الأثقل. هذا التأثير، عندما تنتج قوةٌ صغيرة على مكان في نظام دوراني قوةً أكبر في مكان آخر في ذلك النظام، هو مثال للفائدة الميكانيكية المرتبطة بالروافع.

تحقق من فهمك # ٦: قلع المسامير (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

بعض أنواع المطارق لها مخلب خاص مصمم لقلع المسامير من الخشب، عندما تزلق المخلب أسفل رأس المسمار وتقوم بتدوير المطرقة بسحب مقبضها، فإن المخلب يقلع المسمار من الخشب. رأس المطرقة يلامس

الخشب لتكوين نقطة ارتكاز هي عشر أضعاف أقرب للمسمار منها إلى المقبض. العزم الدوراني الذي تبذله على المطرقة يديرها في اتجاه، بينما العزم الدوراني الذي يبذله المسمار على المطرقة يديرها في الاتجاه المعاكس. لا تخضع المطرقة لأي تسارع زاوي يذكر، فلا بد أن العزوم الدورانية تتوازن تقريباً. إذا كنت تبذل قوة مقدارها 100N (22lbf) على مقبض المطرقة، فما هو مقدار القوة التي يبذلها المسمار على مخلب المطرقة؟

ركوب لعبة الميزان

كلتا لعبتي الميزان في شكل (١٢،١،٢) متوازنة، أي أن محصلة عزم الدوران عليهما تساوي صفرا. فعلى الرغم من أن وزن كل طفل يبذل عزماً دورانياً على لعبة الميزان، لكن مجموع العزمين الدورانيين يؤول إلى الصفر. بما أن لعبة الميزان تواجه محصلة عزم دوراني مساوية للصفر وليس لها تسارع زاوي، فإنها تستمر في الدوران بسرعة زاوية ثابتة.

على أية حال، مما نعرف إلى الآن، أن لعبة الميزان المتوازنة يجب إما أن تبقى ساكنة إلى الأبد أو تدور بشكل لا نهائي في نفس الاتجاه. من غير المحتمل أن ينتظر الأطفال للأبد بدون حركة، والدوران اللانهائي يعني ضمنيا أن الأطفال سيتقلبون رأسا على عقب بشكل دوري. من الواضح أننا قد أهملنا بعض التفاصيل.

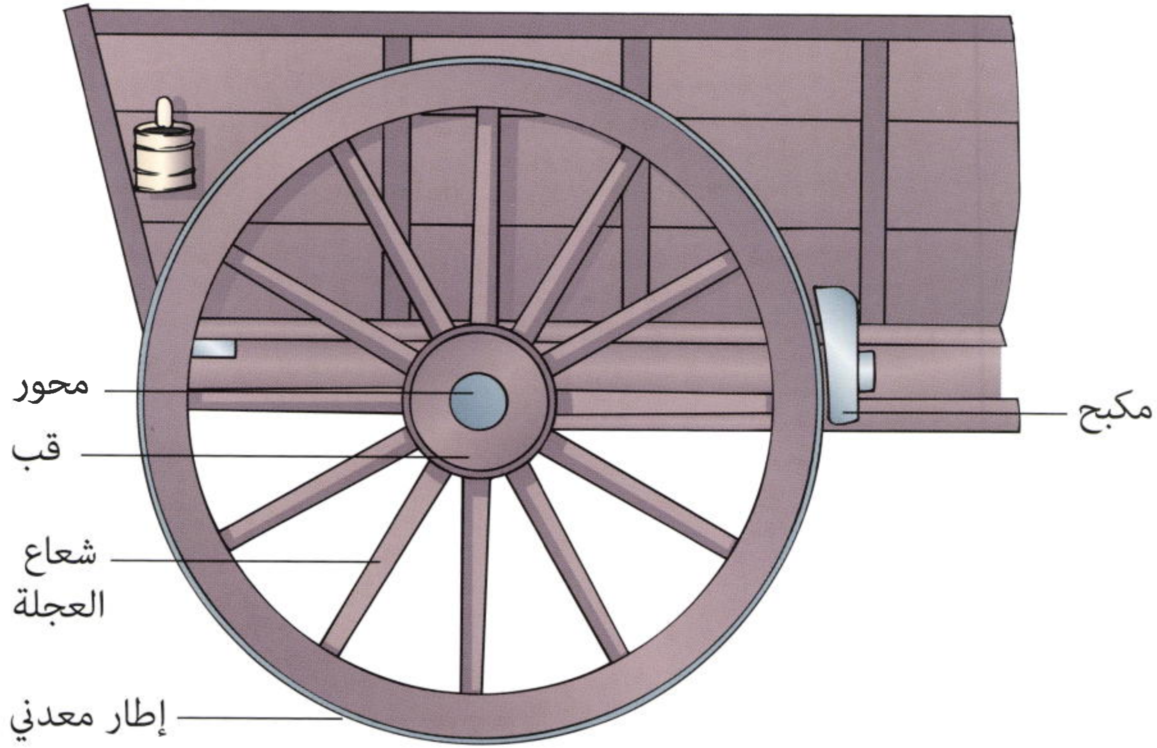
ماذا يفعل الأطفال عندما تكون لعبة الميزان ساكنة؟ لجعل لعبة الميزان تبدأ بالحركة يجب عليهم أن يخلـّوا بتوازن اللعبة. يجب على إحدى الأطفال أن يغير العزم الدوراني الذي يبذله على لعبة الميزان. يمكنه إما أن يغير من القوة للأسفل التي يبذلها على لعبة الميزان أو يغير المسافة التي بين هذه القوة ونقطة الارتكاز. في الحقيقة، يقوم الأطفال بتغيير كلٍّ من القوة وطول ذراع الرافعة كثيراً دون أن يفكروا بالأمر. فإذا مال الطفل للداخل، باتجاه نقطة الارتكاز، فإن طول ذراع الرافعة يقل ويبذل الطفل عزماً دورانياً أقل على لعبة الميزان؛ نتيجة لذلك، تبدأ اللعبة بالدوران ويرتفع الطفل. إذا دفع الطفل الأرض بقدميه، فإن الأرض ستبذل قوة للأعلى عليه، والتي تخفض من القوة والعزم الدوراني الذي يبذله على لعبة الميزان؛ مرة أخرى، ستبدأ اللعبة بالدوران ويرتفع الطفل.

لذا فإنه إما بالميل أو بالدفع على الأرض سيتمكن الأطفال من جعل لعبة ميزان ساكنة ومتوازنة مبدئياً تبدأ بالدوران. بالمثل، عندما يصطدم أحد طرفي لعبة الميزان بالأرض، فإن الأرض تبذل قوة دعم للأعلى عليه. هذه القوة تؤثر بعيدا عن نقطة الارتكاز وعمودياً تقريباً على ذراع الرافعة، لذا فإنها تنتج عزماً دورانياً كبيراً على لعبة الميزان وتمنعها من الدوران بشكل مفاجئ. التسارع الزاوي الناتج كبير بشكل غير مريح، والذي يجعل معظم الأطفال يدفعون على الأرض بأقدامهم لكي يقللوا من حدة التصادم. يمكن للطفلة التي وصلت للأرض أن تستمر في الدفع للأسفل بقدميها إلى أن تبدأ لعبة الميزان بالدوران في الاتجاه المعاكس. هذه الطفلة ستبدأ بالصعود والطفل الآخر بالهبوط. عندما يصل الطرف الآخر إلى الأرض، تبدأ هذه الدورة من جديد.

بينما يلعب الأطفال بلعبة الميزان، فإن الطفلين يغيران تكراراً العزم الدوراني الذي يبذلانه عليها لكي تتأرجح فوق وتحت. أثناء اللحظات التي يقوم فيها الطفل بالدفع على الأرض أو الميل للداخل أو الخارج لجعل لعبة الميزان الساكنة تتحرك، فإن اللعبة عندها لم تعد ساكنة. لعبة الميزان المتوازنة لها تسارع زاوي يساوي صفراً؛ إنه فقط عن طريق إخلال توازن لعبة الميزان أن الأطفال سيتمكنون من تغيير السرعة الزاوية للعبة.

تحقق من فهمك # ٧: هز المركب (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

إن تحميل سفينة شحن كبيرة يتطلب بعض العناية في موازنة الحمولة وربطها للأسفل بقوة لتثبيتها. نقطة الارتكاز الفعّالة التي يمكن للسفينة أن تدور حولها في الماء تقع تقريبا على امتداد الخط المنصف للسفينة، من مقدمتها إلى مؤخرتها. لماذا يعدّ عدم ربط الحمولة بشكل صحيح خطراً على سفينة كهذه، والذي من المحتمل أن يتسبب في انقلاب السفينة أثناء عاصفة؟



٢-٢ العجلات

مثل المنحدرات والروافع، فإن العجلات هي أدوات بسيطة تسهل لنا حياتنا. ولكن الغرض الرئيسي من العجلات ليس الفائدة الميكانيكية، بل التغلب على الاحتكاك. حتى الآن، قمنا بإهمال الاحتكاك، والنظر في قوانين الحركة وكأنها تنطبق فقط في حالات مثالية. ولكن عالمنا الحقيقي فيه احتكاك، والجسم المتحرك يميل إلى التباطؤ والتوقف بسببه. لذا فإن إحدى مهامنا الأولية في هذا القسم ستكون فهم الاحتكاك - مع ذلك، سنستمر في إهمال مقاومة الهواء في الوقت الحالي.

أسئلة للتفكير

إذا كانت الأجسام المتحركة تميل لأن تبقى في حالة حركة، فلماذا يكون سحب صندوق ثقيل على الأرض صعباً جداً؟ إذا كان من المفروض أن تتسارع الأجسام للأسفل من فوق منحدر، فلماذا لا ينزلق طبق من على طاولة مائلة بعض الشيء؟ ما الذي يجعل عجلات عربة تدور عندما تقوم بسحب العربة للأمام؟ كيف يمكن لدوران العجلات أن يدفع السيارة للأمام؟

تجارب يمكن القيام بها

لملاحظة أهمية العجلات في إزالة الاحتكاك، جرّب القيام بزحلقة كتاب على طاولة مستوية. أعطِ الكتاب دفعة وانظر سرعة تباطئه وتوقفه. في أي اتجاه يدفع الاحتكاك الكتاب؟ هل القوة التي يبذلها الاحتكاك على الكتاب تعتمد على سرعة حركة الكتاب؟ دع الكتاب يتوقف. هل مازال الاحتكاك يدفع الكتاب وهو لا يتحرك؟ إذا دفعت بلطف على الكتاب الساكن، ما هي القوة التي يبذلها الاحتكاك عليه؟

رتّب ثلاثة أو أربعة أقلام رصاص مستديرة الجوانب بشكل موازٍ لبعضهما ومفصولة ببضعة بوصات. ضع الكتاب فوق أقلام الرصاص وأعطِ الكتاب دفعة في اتجاه يمكن لأقلام الرصاص أن تتدحرج فيه. صف كيف يتحرك الكتاب الآن، ما الذي تعتقد كان سبباً في الاختلاف؟

تحريك خزانة ملفات: الاحتكاك

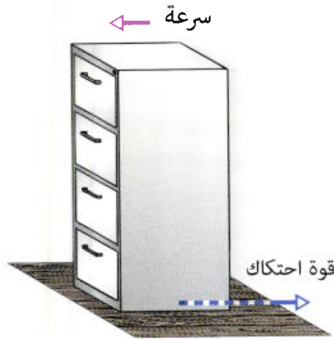
عندما تخيلنا سابقاً في قسم ١-٣ أننا ننقل بيانو صديقك للشقة الجديدة، أهملنا قوة مألوفة – الاحتكاك. من حسن حظنا أن بيانو صديقك كان له عجلات على سيقانه، والعجلات تسهل الحركة عن طريق تقليل تأثير الاحتكاك. سوف نركّز في هذا القسم على العجلات. ولكن لمساعدتنا في فهم العلاقة بين العجلات والاحتكاك، سننظر أولا إلى جسم آخر يحتاج أن يُنقل – خزانة ملفات صديقك.

تقف خزانة الملفات على أرضية ملساء ومستوية من الخشب الصلب، وهي مليئة بأوراق الكتابة الموسيقية وتزن حوالي 1000N (225lbf). بالرغم من كتلتها الكبيرة، أنت تعلم أنها يجب أن تتسارع استجابة لقوة أفقية، لذا تقوم بإعطائها دفعة لطيفة باتجاه الباب، لا يحدث شيء. لابد أن هناك شيئا آخر يقوم بدفع الخزانة بطريقة معينة يؤدي إلى إلغاء قوة دفعك ويمنعها من التسارع. غير مكترث، تقوم بدفع الخزانة بقوة أكبر وأكبر، وأخيرا بدفعة عظيمة تستطيع أن تجعل الخزانة تنزلق على الأرضية. ولكن الخزانة تتحرك ببطء، حتى مع استمرار دفعك لها. هناك شيء آخر يقوم بدفع الخزانة ويحاول أن يمنعها من الحركة.

ذلك الشيء الآخر هو الاحتكاك، وهو قوة تعاكس الحركة النسبية لسطحين متلامسين. السطحان اللذان يكونان في حركة نسبية يتحركان بسرعتين مختلفتين بحيث أن الشخص الذي يقف ساكنا على أحد السطحين يرى السطح الآخر يتحرك، بمعاكسة الحركة النسبية، يبذل الاحتكاك قوة على كلا السطحين باتجاهات تجعلهما يتحركان بسرعة واحدة.

على سبيل المثال، عندما تنزلق خزانة الملفات وحدها باتجاه اليسار، فإن الأرضية تبذل قوة احتكاك عليها باتجاه اليمين (شكل ٢,٢,١). قوة الاحتكاك المبذولة على خزانة الملفات باتجاه اليمين هي في اتجاه معاكس لاتجاه سرعة الخزانة والتي تشير لليسار. بما أن تسارع خزانة الملفات يشير لاتجاه معاكس لاتجاه سرعتها فإن الخزانة تتباطأ إلى أن تتوقف في النهاية.

وفقاً لقانون نيوتن الثالث للحركة، لا بد أن تبذل خزانة الملفات قوة على الأرضية مساوية ومعاكسة للقوة التي تبذلها الأرضية عليها. كما هو متوقع، تقوم الخزانة ببذل قوة احتكاك على الأرضية باتجاه اليسار. ولكن الأرضية متصلة بالأرض بصلابة، لذا فهي قليلة التسارع. تقوم خزانة الملفات بكل التسارع تقريبا، وعاجلاً سيتحرك الجسمان بنفس السرعة.



شكل ١,٢,٢ : خزانة ملفات تنزلق على أرضية باتجاه اليسار. تواجه خزانة الملفات قوة احتكاك باتجاه اليمين والتي تجعلها تقف تدريجيا.

تعارض قوى الاحتكاك الحركة النسبية دائما، ولكنها تتفاوت في الشدة وفقاً لـلآتي: (١) مقدار شدة انضغاط السطحين على بعضهما، و(٢) مقدار زحلقة الأسطح، و(٣) هل في الحقيقة تتحرك الأسطح بالنسبة لبعضهما البعض أم لا. أولا: كلما ضغطت سطحين على بعضهما أكثر زادت قوى الاحتكاك التي يواجهانها. فمثلا، تنزلق خزانة ملفات فارغة بسهولة أكثر من انزلاق خزانة ممتلئة. ثانيا: تخشين الأسطح تزيد من الاحتكاك عموماً، بينما صقل الأسطح أو تزييتها يقلله عموماً. إن ركوب زلاقة في ممر منحدر عندما يكون الممر مغطى بالثلج أو الجليد يكون أكثر تشويقا منه عندما يكون الممر أسفلت عارياً. سوف نتعرض للنقطة الثالثة لاحقا.

تحقق من فهمك #١ : الواحد الذي أفلت (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

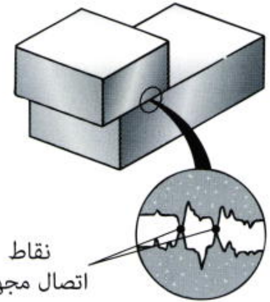
طاولتك في المطعم ليست مستوية، وكأس مائك تبدأ بالانزلاق ببطء للأسفل نـحو الحافة. في أي اتجاه يؤثر الاحتكاك بقوة عليها؟

نظرة مجهرية للاحتكاك

بينما تنزلق خزانة الملفات وحدها على الأرضية، تواجه قوة احتكاك أفقية تعمل على وقف حركتها تدريجيا. ولكن من أين تأتي قوة الاحتكاك هذه؟ إن القوى الواضحة على خزانة الملفات كلتاهما رأسية وليستا أفقية: وزن الخزانة للأسفل ودعم الأرضية للأعلى. فكيف يمكن للأرضية أن تبذل قوة أفقية على خزانة الملفات؟

تكمن الإجابة في حقيقة أن كل من أسفل خزانة الملفات وسطح الأرضية ليس ناعماً تماما. كلاهما لديه قمم وقيعان مجهرية ذات أحجام مختلفة.

في الحقيقة، خزانة الملفات مدعومة من قبل آلاف من نقاط الالتماس الصغيرة جدا، والتي عندها تلامس الخزانة الأرضية مباشرة (شكل ٢,٢,٢). بينما تنزلق خزانة الملفات، تمر البروزات المجهرية في أسفل الخزانة ببروزات مجهرية مماثلة على سطح الأرضية. كلما يتصادم بروزان سيواجهان قوى أفقية. هذه القوى الصغيرة جدا تعارض الحركة النسبية وتسبب في ظهور قوى الاحتكاك الإجمالية التي تواجهها خزانة الملفات والأرضية. ولأن حتى الأسطح التي تبدو أنها مصقولة مازال لديها بعض من التركيب السطحي المجهري، فإن جميع الأسطح تواجه احتكاكاً عند فرك بعضهما ببعض.



شكل ٢,٢,٢ : سطحان مضغوطان على بعضهما يتلامسان حقيقة عند نقاط التماس معينة فقط. عندما ينزلق السطحان على بعضهما، فإن هذه النقاط تتصادم وتنتج احتكاك انزلاق وتلفاً.

إن زيادة حجم أو عدد هذه البروزات المجهرية عن طريق تخشن الأسطح تؤدي عموماً إلى زيادة في الاحتكاك. إذا وضعت ورق صنفرة في أسفل خزانة الملفات، فإنها سوف تواجه قوى احتكاك أكبر حين تنزلق على الأرضية. من جانب آخر، الأسطح المصقولة مجهريا و(ضد الالتصاق)، مثل التي تستخدم في أواني الطبخ الحديثة، ستجعل خزانة الملفات تنزلق بسهولة.

إن زيادة عدد نقاط الاتصال بين السطحين عن طريق ضغط السطحين على بعضهما بإحكام تؤدي أيضاً إلى زيادة الاحتكاك. ببساطة تصطدم البروزات المجهرية أكثر. ولهذا، فإن إضافة المزيد من أوراق الكتابة الموسيقية لخزانة الملفات ستزيد من صعوبة انزلاقها. مضاعفة وزن الخزانة تؤدي تقريباً إلى مضاعفة نقاط الاتصال وتضاعف صعوبة تحريك الخزانة على الأرضية. هناك قاعدة تجريبية مفيدة تنص على أن قوى الاحتكاك بين سطحين تتناسب مع القوى التي تضغط هذين السطحين على بعضهما.

كما يسبب الاحتكاك تلفاً عندما تكسّر نقاط الاتصال المتصادمة بعضها البعض. مع الوقت، هذا التلف يمكن أن يزيل كمية كبيرة من المادة حتى أن الدرج المصنوع من الصخر، والذي يبدو أنه غير قابل للتلف، سيتلف تدريجيا بواسطة مرور الأقدام عليه. الطريقة المثلى لتقليل الإتلاف بين سطحين (غير إضافة زيت تشحيم بينهما) هي صقل السطحين لكي يكونا فائقي النعومة. ستستمر الأسطح المصقولة في التلامس عند نقاط الاتصال وتواجه احتكاكاً عندما ينزلقان على بعضهما، ولكن نقاط اتصالهما ستكون عريضة ومكوّرة ونادراً ما ستكسر بعضها البعض أثناء التصادم.

تحقق من فهمك # ٢: الوزن والاحتكاك (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

ما مقدار الزيادة في صعوبة زحلقة كتابين متماثلين متراصين فوق بعضهما على طاولة مقارنة بزحلقة أحد هذين الكتابين فقط؟

الاحتكاك الساكن، واحتكاك الانزلاق، واحتكاك الالتصاق

في الحقيقة هناك نوعان من الاحتكاك - الانزلاقي والساكن. عند تحرك سطحين على بعضهما، فإن الاحتكاك الانزلاقي يعمل على إيقاف انزلاقهما. ولكن حتى عندما يكون لذلك السطحين السرعة نفسها ، فإن الاحتكاك الساكن قد يعمل على منعهم من بدء الانزلاق على بعضهما في المقام الأول.

تجد أنه من الصعب بدء خزانة الملفات بالانزلاق على الأرضية. استقرت نقاط الاتصال بين الخزانة والأرضية

في فجوات بعضهما، فدفعة صغيرة لا تفعل شيئا. الاحتكاك الساكن دائماً يبذل قوة احتكاك تعادل تماما دفعتك. بما أن محصلة القوة على خزانة الملفات تساوي صفرا، فإنها لن تتسارع.
ولكن القوة التي يمكن أن يبذلها الاحتكاك الساكن محدودة لجعل خزانة الملفات تتحرك، ستحتاج لإعطائها دفعة هائلة، وبالتالي تبذل قوة أفقية عليها أكثر مما يمكن للاحتكاك الساكن أن يبذلها في الاتجاه الآخر. عندها لن تكون محصلة القوة على خزانة الملفات صفراً وستتسارع.

عندما تبدأ حركة خزانة الملفات، يُستبدل الاحتكاك الساكن باحتكاك الانزلاق. بما أن احتكاك الانزلاق يعمل على إعادة خزانة الملفات إلى السكون، فيجب عليك أن تدفع الخزانة لإبقائها على الحركة. ولكن مع انزلاق خزانة الملفات على الأرضية، فإن نقاط الاتصال بين السطحين ليس لديها الوقت الكافي للاستقرار داخل فجوات بعضهما، وبناء على ذلك ستواجه تلك النقاط قوى أفقية أضعف. لهذا، فإن قوة احتكاك الانزلاق عموما أضعف من قوة الاحتكاك الساكن، ويفسّر ذلك لماذا يكون إبقاء حركة خزانة الملفات المتحركة أسهل من محاولة جعلها تبدأ بالحركة.

كلا شكلي الاحتكاك مدموج في مفهوم الاحتكاك الالتصاقي - وهو أكبر كمية من قوة الاحتكاك التي يمكن أن تجدها خزانة الملفات من الأرضية في أي لحظة. عندما تكون خزانة الملفات في وضع السكون، احتكاكها الالتصاقي يساوي القيمة العظمى للقوة التي يبذلها الاحتكاك الساكن عليها. ولكن بمجرد أن تبدأ بالانزلاق على الأرضية، فإن احتكاكها الالتصاقي يقل ليصل لمقدار القوة التي يبذلها احتكاك الانزلاق.

بينما يشكل احتكاك الالتصاق لخزانة الملفات شيئاً مزعجاً يجب أن تتغلب عليه، فإن احتكاك حذائك الالتصاقي بالأرضية مهم. ما لم يمكنك أن تدفع على الحائط، فإن حذاءك سيحتاج احتكاكاً التصاقياً كافياً لتوفير القوة الأفقية اللازمة لتحريك خزانة الملفات. لنتمنى أنك ترتدي حذاءك من النوع دوك مارتن (Doc Martens)!

تحقق من فهمك # ٣: التزحلق حتى التوقف (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

إن المكابح المانعة للانغلاق تمنع عجلات السيارة من الانغلاق والتزحلق أثناء توقف مفاجئ. بعيدا عن قضايا القيادة والتوجيه، ما هي الفائدة من منع العجلات من التزحلق (الانزلاق) على الرصيف؟

الشغل والطاقة والقدرة

هناك اختلاف آخر بين الاحتكاك الساكن واحتكاك الانزلاق: احتكاك الانزلاق يهدر الطاقة. إنه لا يمكن أن يجعل تلك الطاقة تختفي جملة لأن الطاقة، كما رأينا، هي كمية محفوظة: لا يمكن أن تُنشأ أو تُفنى. ولكن يمكن للطاقة أن تنتقل بين الأجسام أو تتحول من نوع لآخر. الذي يقوم به احتكاك الانزلاق هو تحويل طاقة مفيدة ومنتظمة - الطاقة التي يمكن أن تستخدم بسهولة للقيام بشغل - إلى طاقة مضطربة وعديمة الفائدة نسبياً. هذه الطاقة المضطربة تسمى طاقة حرارية، وهي الطاقة المرتبطة بدرجة الحرارة. تدعى أحيانا بالطاقة الداخلية أو الحرارة. احتكاك الانزلاق يجعل الأشياء تسخن بتحويل الشغل إلى طاقة حرارية.

كما رأينا في قسم (١-٣)، الطاقة هي المقدرة على القيام بشغل وتنتقل بين الأجسام عن طريق القيام بذلك الشغل. كما يمكن للطاقة أن تغيّر من شكلها، فتظهر إما على شكل طاقة حركية في حركة الأجسام أو كطاقة كامنة في القوى بين أو داخل تلك الأجسام. بالممارسة، يمكنك أن «تشاهد» الطاقة تتدفق خلال نظام تماما مثل ما يشاهد محاسب تدفق المال خلال شركة.

الشكل الأكثر وضوحا من أشكال الطاقة هو الطاقة الحركية، أي طاقة الحركة، من السهل رؤية الطاقة الحركية تنتقل من أو إلى جسم ما. عندما تخرج الطاقة الحركية من جسم ما، فإن الجسم يتباطأ؛ لذا فإن الماء المتحرك يتباطأ عندما يقوم بتحريك طاحونة، وكرة البولنج تتباطأ عندما تُسقط أوتاد البولنج. بالمقابل، عندما تدخل الطاقة الحركية جسماً ما، فإن الجسم يتسارع.

تتحرك كرة البيسبول بسرعة أكبر عندما تقوم بشغل عليها أثناء قذفها؛ أنت تنقل طاقة من جسمك إلى كرة البيسبول، حيث تصبح الطاقة طاقة حركية في حركة كرة البيسبول.

إن الطاقة الكامنة مخزونة في القوى بين أو داخل الأجسام، وفي الغالب ليست مرئية كالطاقة الحركية. يمكنها أن تأخذ العديد من الأشكال، بعضها يظهر في الجدول ٢,٢,١. في كل الحالات لا يتحرك شيء، ولكن بما أن الأجسام مازالت لديها المقدرة على القيام بشغل، فإنها تحتوي على طاقة كامنة.

نحن نقيس الطاقة بالعديد من الوحدات: الجول (J)، والسعرات الحرارية (الكالوري)، والسعرات الغذائية الحرارية (تسمى أيضا الكيلو كالوري)، وكيلووات-ساعة، على سبيل المثال لا الحصر، جميع هذه الوحدات تقيس الشيء نفسه، وتختلف عن بعضها فقط بمعاملات التحويل العددية، والتي يمكن أن تجد بعضها في الملحق ب. على سبيل المثال، 1 سعرة غذاء حرارية تساوي 1000 سعرة حرارية أو 4187J، لذا فإن كعكة الدونات المحشية بالمربى والتي فيها حوالي 250 سعرة غذاء حرارية تحتوي على حوالي 1,000,000J من الطاقة. وبما أن الجول هو تماما مثل النيوتن-متر، فإن 1,000,000J هي الطاقة التي تستخدمها لرفع خزانة ملفات صديقتك لشقة الطابق الثاني مائتي مرة (1000N مضروبا في 5m للأعلى يساوي 5000J من الشغل لكل جولة). لا عجب أن أكل الكعك يؤثر تأثيرا سلبيا على قوام جسمك!

بالطبع، يمكنك استهلاك الطاقة الموجودة في كعكة الدونات المحشية بالمربى بعد حين؛ فالأمر يتطلب وقتاً فقط. مقدار الشغل الذي تستطيع أن تقوم به كل ثانية محدود. إن مقياس معدل قيامك بشغل هو القدرة - مقدار الشغل الذي تقوم به في فترة زمنية معينة، أو

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}}$$

وحدة القدرة في النظام العالمي للوحدات SI هي جول-لكل-ثانية، وتسمى أيضا الواط (اختصارا W). وحدات أخرى للقدرة تشمل كالوري-لكل-ساعة، والقدرة الحصانية؛ مثل وحدات الطاقة، تختلف هذه الوحدات فقط في المعاملات الرقمية، والمدرجة أيضا في الملحق ب. مثلا، 1 قدرة حصانية تساوي 745.7W. وبما أن محركاً ذا 1 قدرة حصانية يقوم بشغل مقداره 745.7J في الثانية الواحدة، وبما أنه يتطلب 5000J من الشغل لنقل خزانة الملفات للطابق الثاني، فإن ذلك المحرك لديه القدرة الكافية للقيام بهذه المهمة في حوالي 6.7s.

تحقق من فهمك # ٤ : عرض التفاحة (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

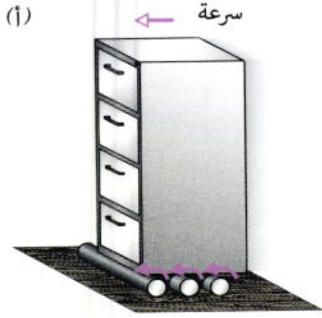
تتبع تدفق الطاقة عندما تقوم رامية برمي تفاحة مستقرة على رأس مساعدها بسهم.

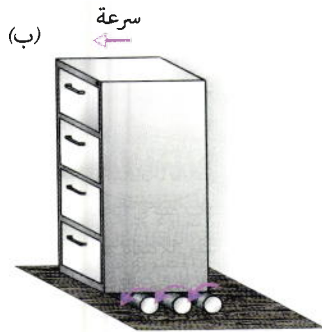
جدول ٢,٢,١ : أشكال وأمثلة متعددة للطاقة الكامنة.

شكل الطاقة الكامنة	مثال
طاقة الجاذبية الكامنة	كرة بولنج في قمة هضبة
الطاقة المرنة الكامنة	زنبرك ساعة ملفوف
الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة	سحابة في عاصفة رعدية
الطاقة الكيميائية الكامنة	ألعاب نارية
الطاقة النووية الكامنة	يورانيوم

الاحتكاك والطاقة الحرارية

ولكن ماذا عن الطاقة الحرارية الناتجة من احتكاك الانزلاق؟ هل الطاقة الحرارية نوع جديد من أنواع الطاقة الكامنة أم بديل للطاقة الحركية؟





شكل ٣،٢،٢: (أ) خزانة الملفات المدعومة بأسطوانات قابلة للدوران تواجه فقط الاحتكاك الساكن. (ب) بما أن السطح العلوي للأسطوانة يتحرك للأمام مع خزانة الملفات، **بينما** السطح السفلي للأسطوانة يظل مع الرصيف، فإن مركز الكتلة للأسطوانة يتحرك فقط بنصف سرعة خزانة الملفات. **نتيجة** لذلك، فإن **الأسطوانات ستتخلف عن الخزانة قريباً.**

في الحقيقة، هي ليست أيا منهما. الطاقة الحرارية في الواقع مزيج من الطاقات الحركية والكامنة الاعتيادية. لكن على خلاف الطاقة الحركية الموجودة في كرة متحركة أو الطاقة الكامنة الموجودة في بيانو مرفوع، فالطاقات الحركية والكامنة الموجودة في الطاقة الحرارية هي طاقات غير منتظمة عند المستوى الذري والجزيئي. تجعل الطاقة الحرارية كل جسيم مجهري في الجسم يتذبذب بشكل مستقل؛ في أي لحظة، كل جسيم له مخزون صغير خاص به من الطاقات الكامنة والحركية، ومجموع هذه الطاقات المتشتتة تدعى بالطاقة الحرارية.

عندما تدفع خزانة الملفات على الأرضية، فأنت تقوم بشغل عليها، ولكنها لا تزداد سرعة. بدلا من ذلك، يحوّل احتكاك الانزلاق الشغل الذي تقوم به إلى طاقة حرارية، فتسخن خزانة الملفات عندما تتشتت الطاقة التي حوّلتها إليها بين جزيئاتها. ولكن بينما يحوّل احتكاك الانزلاق الشغل إلى طاقة حرارية بسهولة، لا توجد طريقة سهلة لإعادة تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل. إن عدم الانتظام لا يجعل الأشياء أصعب في الاستخدام فحسب، ولكنه أيضا من الصعب إبطاله. عندما تُسقط كوب قهوتك المفضل على الأرضية ويتحطم لألف قطعة، فإن الكوب مازال موجودا، ولكنه غير منتظم، وبالتالي أقل فائدة بكثير. ومثلما أن إسقاط قطع الكوب مرة أخرى على الأرضية لن يعيد تجميع قطع كوبك، فالطاقة المحوّلة إلى طاقة حرارية لا يمكن إعادة تجميعها بسهولة لطاقة منتظمة ومفيدة.

إن احتكاك الانزلاق دائماً يحوّل بعضاً من الشغل على الأقل لطاقة حرارية. بما أن أي سطحين منزلقين على بعضهما يواجهان قوى احتكاك تعاكس حركتهما النسبية، فاحتكاك الانزلاق يبذل شغلاً سالباً عليهما؛ يستخرج طاقة من جسم منزلق ويحوّلها إلى طاقة حرارية. وهكذا. بينما تقوم بشغل على خزانة الملفات بدفعها على الأرضية، يقوم احتكاك الانزلاق بشغل سالب عليها. الطاقة الحركية لخزانة الملفات لا تتغير كثيرا ولكن طاقتها الحرارية تستمر في الازدياد.

على النقيض من ذلك، الاحتكاك الساكن لا يحوّل الشغل إلى طاقة حرارية. بما أن أي سطحين يواجهان احتكاكاً ساكناً لا يتحركان بالنسبة لبعضهما، فلا توجد مسافة مقطوعة، وبالتالي لم يُبذل أي شغل.

يمكنك أن تدفع خزانة الملفات طوال اليوم دون أن تقوم بأي شغل عليها. حتى وإن رفعت خزانة الملفات للأعلى بيديك (وهذه ليست مهمة سهلة)، فإن الاحتكاك الساكن بين يديك وجوانب خزانة الملفات يساعدك فحسب في القيام بشغل على خزانة الملف ذاتها. عندما ترفع خزانة الملفات للأعلى، فإن جميع الشغل الذي تقوم به يذهب لزيادة طاقة الجاذبية الكامنة لخزانة الملفات.

تحقق من فهمك # ٥: المطاط المحترق (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

إذا دفعت دواسة التسارع في سيارتك بقوة كبيرة عندما يتغير لون إشارة المرور للون الأخضر، فإن عجلات سيارتك ستنزلق وتترك خلفها أثراً أسوداً من المطاط. هذه البداية «الأرنبية» يمكن أن تسبب تلفاً لعجلات سيارتك مثل ما تسببه القيادة الطبيعية لمسافة 50km (31miles). لماذا يكون الانزلاق أكثر ضررا على عجلات السيارة من قيادة السيارة الطبيعية؟

العجلات

تصارعت مع خزانة ملفات صديقك لإخراجها من باب شقته القديمة، والآن أنت تقوم بسحبها على طول الرصيف. أنت تقوم بشغل ضد احتكاك الانزلاق طوال الطريق، وتنتج كميات كبيرة من الطاقة الحرارية في كل من أسفل خزانة الملفات وسطح الرصيف. أنت أيضا تقوم بإتلاف الجسمين، لأن احتكاك الانزلاق يتسبب في إتلاف سطحيهما.

صور بيتمان/كوربس



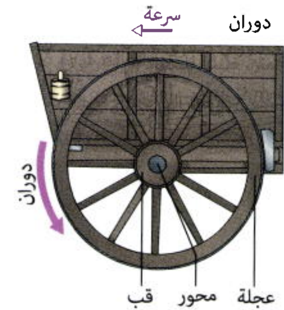
شكل ٤،٢،٢: عندما تتحرك عربة الجياد هذه للأمام، فإن احتكاك الانزلاق الناشئ بين محاورها وأقبها يحوّل بعضاً من طاقة حركتها إلى طاقة حرارية. للتقليل من هذه الطاقة المهدرة، فإن محاور العربة تكون ضيقة وتزيت بالشحم.

إن خزانة الملفات ذات الأربع أدراج قد تصبح ذات ثلاثة أدراج في الوقت الذي تحتاجه لتصل للشقة الجديدة.

لحسن الحظ، هناك أنظمة ميكانيكية يمكنها أن تساعدك في نقل جسم ما على آخر بدون انزلاق أو احتكاك انزلاق، المثال التقليدي هو الأسطوانة (شكل ٣،٢،٢). إذا وضعت خزانة الملفات على أسطوانات، فإن تلك الأسطوانات ستدور أثناء تحرك خزانة الملفات، بحيث لا تنزلق أسطحها على أسفل الخزانة أو سطح الرصيف. لرؤية كيف تعمل الأسطوانات، اجعل إحدى يديك على شكل قبضة ودحرجها على راحة يدك الأخرى. إن جلد إحدى اليدين لا ينزلق على جلد اليد الأخرى؛ بما أن هذه الحركة الصامتة لا تحوّل الشغل لطاقة حرارية، سيظل جلدك باردا. والآن زحلق راحتي يديك المفتوحتين على بعضهما؛ هذه المرة، احتكاك الانزلاق سيدفئ جلدك.

بالرغم من أن الأسطوانات لا تواجه احتكاك الانزلاق، فهي تواجه الاحتكاك الساكن، أعلى كل أسطوانة يلامس أسفل الخزانة، ويتحرك السطحان مع بعضهما نتيجة للاحتكاك الساكن؛ فهما يتمسكان ببعضهما بإحكام إلى أن يسحبهما دوران الأسطوانات بعيداً عن بعض. نفس العملية تحدث بين الأسطوانات وسطح الرصيف؛ يبذل الاحتكاك الساكن عزماً دورانياً على الأسطوانات، وذلك ما يجعلها تدور في المقام الأول. مرة أخرى، يمكنك تصوّر هذا السلوك بيديك. حاول سحب قبضة يدك على راحة يدك المفتوحة. قبل أن تبدأ قبضتك بالانزلاق ستشعر بعزم دوراني عليها. الاحتكاك الساكن بين جلدي يديك، والذي يعمل على منع الانزلاق، يتسبب في جعل قبضتك تدور مثل الأسطوانة.

عندما تتمكن من تحريك خزانة الملفات على الأسطوانات، يمكنك أن تجعلها تتدحرج على الرصيف المستوي للأبد. بدون وجود احتكاك الانزلاق، فإن الخزانة لن تفقد طاقة حركية، فتستمر في التحرك بسرعة ثابتة دون الحاجة لقيامك بدفعها. ولكن الأسطوانات ستخرج من أسفل خزانة الملفات أثناء تحركها، وستضطر لنقل الأسطوانات باستمرار من خلف الخزانة إلى أمامها. في الحقيقة، ستحتاج على الأقل ثلاث أسطوانات لتضمن أن خزانة الملفات لا تسقط أبدا على الأرض عندما تخرج إحدى الأسطوانات من الخلف. على الرغم من أن الأسطوانات قد ألغت احتكاك الانزلاق، إلا أنها أحدثت إزعاجاً آخر – والذي يجعل فكرة القيام برحلة طويلة غير جذابة. هل هناك أداة أخرى يمكنها تقليل احتكاك الانزلاق دون الحاجة لمراقبة دائمة لها؟



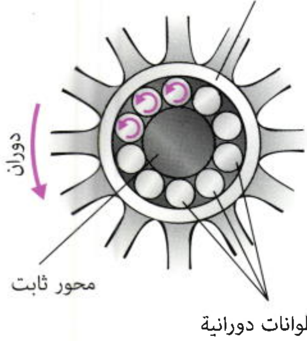
شكل ٥،٢،٢: تدور عجلة أثناء سيرها، بحيث لا يحدث احتكاك انزلاق بينها وبين الأرض. تنتقل الحمولة للعجلة عن طريق محور يمر في فتحة مركزية في العجلة، والتي تسمى بالقُبّ. عندما تدور العجلة، فإن القب يحتك بالمحور مسبباً في حدوث بعض من احتكاك انزلاق وتلف.

أحد البدائل هو عربة ذات أربع عجلات. أبسط عربة هي التي تستقر على أعمدة أو محاور ثابتة تمر خلال فتحات مركزية أو أقبّ (hubs) في العجلات الأربعة (شكل ٤،٢،٢). تبذل الأرض قوة داعمة للأعلى على العجلات، وتبذل العجلات قوة داعمة للأعلى على المحاور، والمحاور تدعم العربة ومحتوياتها. مع حركة العربة للأمام، تدور عجلاتها بحيث لا تنزلق أسطحها السفلية أو تتزحلق على الأرض؛ بدلا من ذلك، تُنزل كل عجلة جزءاً من سطحها على الرصيف، تاركة ذلك الجزء لفترة قصيرة يواجه احتكاكاً ساكناً، ثم ترفعه للأعلى بعيدا عن الرصيف، بينما يحل جزء جديد مكانه. هكذا يكون هناك فقط احتكاك ساكن بين عجلات العربة والأرض.

لسوء الحظ، عندما تدور كل عجلة، فإن قُبّها يتزحلق على المحور الثابت الذي يمر في مركزه (شكل ٥،٢،٢). هذا الاحتكاك الانزلاقي يبدد الطاقة ويحدث تلفاً في كل من القبّ والمحور. ولكن القب الضيق يتحرك ببطء نسبياً على المحور، فيكون الشغل والتلف الناتجان كل ثانية قليلين. ومع ذلك، فإن هذا الاحتكاك الانزلاقي غير مرغوب ويمكن تقليله بشكل ملحوظ بتزييت القب والمحور بـ «شحم العجلات».

حل أفضل هو أن تدخل أسطوانات بين القب والمحور (شكل ٦،٢،٢). والنتيجة هي محمل دُحروجي (Roll-er-bearing)- وهو أداة ميكانيكية تقلل من احتكاك الانزلاق بين القب والمحور. إن محملاً دحروجياً كاملاً يتكون من حلقتين يفصل بينهما أسطوانات تمنع تلك الحلقتين من الاحتكاك ببعضهما. في هذه الحالة، تكون

الحلقة الداخلية للمحمل الدحروجي متصلة بالمحور الثابت بينما حلقتها الخارجية متصلة بقب العجلة التي تدور. إن العجلات غير الدافعة في السيارة تدعم بواسطة محامل من هذا النوع موجودة على محاور ثابتة أساسا. وبالمثل تدعم العجلة غير الدافعة في الدراجة على محور ثابت، ولكن محاملها تستخدم كرات بدلا من أسطوانات - محامل دحروجية ذات كرات (Ball-bearings). عندما تبدأ أي من هاتين المركبتين بالحركة للأمام، فإن الاحتكاك الساكن مع الأرض يبذل عزماً دورانياً على العجلات الحرة فتبدأ بالدوران.



W-0031

شكل ٦,٢,٢: في محمل دحروجي ذي أسطوانات، قب العجلة لا يلامس المحور مباشرة، بدلا من ذلك، يفصل بين الاثنين مجموعة من الأسطوانات التي تدور مع القب. البضع من الأسطوانات التي في الأسفل تتحمل أكثر الحمولة، لأن القب يدفعها إلى الأعلى وهي تدفع المحور للأعلى. عندما تدور العجلة، تتنقل الأسطوانات أثناء الدوران فتصعد إلى اليمين وفوق المحور قبل أن تعود للأسفل من اليسار لتحمل الحمولة مرة أخرى. الأسطوانات والعجلة والمحور يواجهون فقط احتكاكاً ساكناً وليس احتكاك انزلاق. في محمل دحروجي ذي كرات تستبدل الأسطوانات بكرات.

إن العجلات الدافعة للسيارة أيضا تدعم بواسطة محامل ذات أسطوانات، ولكن المحامل هذه تعمل بشكل مختلف. بما أن المحرك يجب أن يتمكن من بذل عزم دوراني على كل عجلة دافعة، فهذه العجلات تكون مثبتة بإحكام بمحاورها. عندما يقوم المحرك بإدارة أحد هذه المحاور، فإن المحور يدير عجلته. المحمل يمنع المحور الذي يدور من الاحتكاك مع إطار السيارة. الحلقة الخارجية لهذا المحمل متصلة بإطار السيارة الثابت، بينما حلقته الداخلية متصلة بالمحور الذي يدور.

عندما تبدأ العجلة الدافعة بالدوران، فإنها تواجه احتكاكاً ساكناً مع الأرض، والأرض تدفع أسفل العجلة أفقيا لمنعها من الانزلاق. بما أن هذه القوة هي القوة الأفقية الوحيدة المؤثرة على السيارة، فإن السيارة تتسارع للأمام.

اتباعاً للفكرة الجيدة عندما تطرأ لك، تقوم بتحميل خزانة الملفات في المقعد الخلفي لسيارتك الجاغوار XK8 ذات السطح المكشوف وتجلس في مقعد القيادة. استجابة السيارة ليست كالمعتاد بسبب الكتلة الزائدة، ولكنها مازالت قادرة على التسارع بجودة متوسطة. بعد بضع ثوان، أنت تسير على الطريق باتجاه الشقة الجديدة والصديق الممتن جدا لك.

تحقق من فهمك #٦: حركات جوهرة (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

إن العديد من الساعات الكبيرة والساعات اليدوية الأثرية الميكانيكية تعلن بفخر أن لها «أجزاء متحركة من الجواهر». إن التروس داخل هذه الساعات تدور حول محاور مستدقة الرأسين ومسندة عند الرأسين بأحجار كريمة صلبة ومصقولة. ما هي الفائدة من كون أطراف المحاور لها نهايات مشابهة للإبر ودعم تلك الإبر بأحجار كريمة صلبة ومصقولة؟

الطاقة الحركية

عندما تقترب من مفرك، تبدأ بالتفكير بكابحات السيارة. صُممت الكابحات لتوقيف السيارة عن طريق تحويل طاقتها الحركية إلى طاقة حرارية، فهي تؤدي عملها بحك دواسة الكابح الثابتة بأقراص معدنية دوّارة، حتى يستطيع احتكاك الانزلاق أن يحول الطاقة. مع أنك واثق أن تلك الكابحات قادرة على إنجاز المهمة، لكن ما هو بالضبط مقدار الطاقة الحركية التي يجب أن تحولها الكابحات لطاقة حرارية؟

إحدى الطرق لتحديد الطاقة الحركية للسيارة هي أن تقوم بحساب الشغل الذي بذله محرك السيارة بينما أوصلها من حالة السكون إلى سرعتها الحالية. نتيجة ذلك الحساب هي أن الطاقة الحركية للسيارة المتحركة تساوي نصف كتلتها مضروبا في مربع سرعتها. هذه العلاقة يمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}$ × الكتلة × (السرعة)^2 (١,٢,٣)

ورمزيا:

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

وفي لغة الحياة اليومية: السباق بضعف السرعة يحتاج أربعة أضعاف الطاقة.

بوجودك ووجود خزانة الملفات في السيارة، فإن الجاغوار XK8 لها كتلة تساوي حوالي 2000kg (4400lbm). عند سرعة 100km/h (62mph)، يكون لها طاقة حركية أكبر من 770,000J. تلك الطاقة الهائلة هي أربعة أضعاف ما هي عليه لو كانت سرعة السيارة 50km/h (31mph)، فضعْ هاتفك الجوال جانباً وسُقْ سيارتك بحذر. إن الزيادة المدهشة في الطاقة الحركية الناتجة عن الزيادة البسيطة في السرعة تفسر لماذا تكون التصادمات ذات السرعات العالية أشد فتكاً من ذات السرعات المنخفضة، ولماذا يفحص ذلك الشرطي سيارتك بالرادار. السيارات الحمراء تسترعي كل الانتباه.

أنت تسير بسلامة وفق السرعة المحددة وتبادل شرطي المرور بتحية مهذبة. ولكن بعد قليل تتجاوز سيارة أخرى تم إيقافها لإعطائها قسيمة مخالفة. المصباح الموجود على سيارة الشرطة يدور ويدور، والأجسام التي تدور لها طاقة حركية أيضا، مثل الطاقة الحركية للحركة الانتقالية، فإن الطاقة الحركية للحركة الدورانية تعتمد على القصور الذاتي للمصباح وسرعته. ولكن بالنسبة للمصباح الذي يدور، فالذي يهم هو قصوره الذاتي الدوراني ومقدار سرعته الدورانية. الطاقة الحركية للمصباح تساوي نصف كتلته الدورانية مضروبا في مربع سرعته الزاوية. هذه العلاقة يمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}$ × الكتلة الدورانية × السرعة الزاوية^2 (٢,٢,٣)

ورمزيا:

$$K = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

وفي لغة الحياة اليومية: يتطلب وجود شخص نشيط جدا ليدير عجلاته بضعف السرعة.

بعد إنهاء إجراءات قسيمة المخالفة، تعود سيارة الشرطة إلى طريق السير ومازال مصباحها يدور. إن طاقة المصباح الحركية الكلية هي الآن مجموع جزئين: طاقة حركية انتقالية وطاقة حركية دورانية. تعتمد طاقته الحركية الانتقالية على سرعة مركز كتلة المصباح، والذي يساوي سرعة سيارة الشرطة في الطريق. وتعتمد طاقته الحركية الدورانية على السرعة الزاوية التي يدور بها المصباح حول مركز كتلته.

عندما تبتعد سيارة الشرطة وتختفي عن نظرك، يخطر لك أن عجلات سيارتك التي تدور لها أيضاً طاقة حركية دورانية تضيف لطاقة السيارة الحركية الانتقالية الكبيرة. ومع ذلك، تثق في كابحات سيارتك. بعد بضع دقائق، تصل لوجهتك وتضغط الكابحات حتى تقف. بالرغم من إدراكك للكتلة الإضافية حيث تتباطأ السيارة بمعدل أقل من المعتاد، فإن الكابحات تحول الطاقة الحركية للسيارة إلى طاقة حرارية بنجاح. لقد حققت هدفك والآن أنت بطل.

تحقق من فهمك #٧: قذف كرة سريعة (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

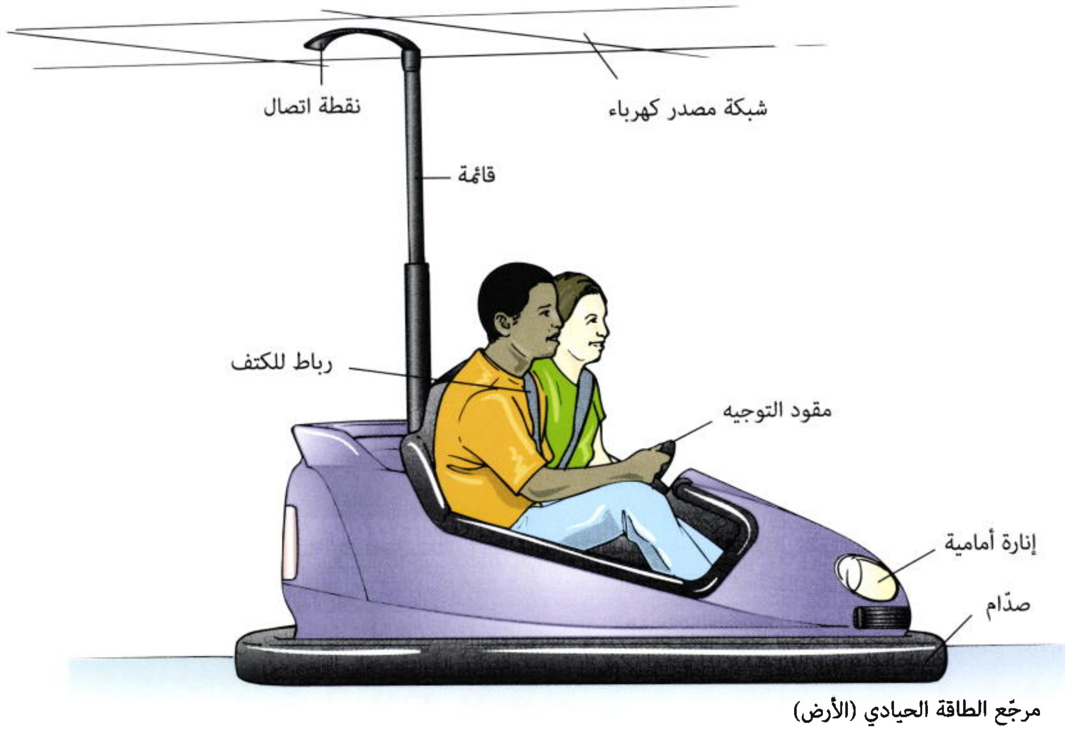
يستطيع طالب مرحلة ابتدائية اعتيادي أن يقذف كرة بيسبول بسرعة 80km/h (50mph)، ولكن فقط بضع من الرياضيين المحترفين لديهم القوة الهائلة اللازمة لقذف كرة بيسبول بضعف هذه السرعة. لماذا يعدّ قذف الكرة بضعف السرعة فقط أمراً صعباً جدا؟

دقق في أرقامك #١: النفخ في الريح (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

يسير الهواء في إعصار بسرعة مقدارها 200km/h (124mph). ما مقدار الزيادة في الطاقة الحركية لـ1kg من هذا الهواء مقارنة بـ 1kg من هواء يسير فقط بسرعة 20km/h؟

دقق في أرقامك #٢: اللعب في ساحة اللعب (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

عندما يركب أطفال على دوامة الخيل (merry-go-round)، فإنهم يزيدون من قصورها الذاتي الدوراني. إذا ضاعف الأطفال الكتلة الدورانية للدوامة ثلاثة أضعاف، فكيف سيغيرون الطاقة الحركية لها عندما تدور الدوامة بسرعة زاوية معينة؟



٢-٣ سيارات التصادم

مع أن تصادم السيارات لا يعد في العادة شيئاً مرحاً خارج الأفلام والتلفاز، إلا أن هناك استثناءً واحداً مبهجاً: سيارات التصادم في الملاهي. لبضع دقائق، يتسابق السائقون في مدينة الملاهي بجنون في حلبة بيضاوية الشكل، ويتعمدون صدام سياراتهم في سيارات أخرى ويضحكون بشكل هستيري لهذه التصادمات العنيفة. إن التصادمات والهزّ العنيف والدوران هي نصف المرح، والأعجوبة أنه لا يصاب أحد بتشنج في عنقه. ولكن يتخفى في هذه الإثارة العديد من المفاهيم الفيزيائية المهمة، والتي تؤثر على جميع الأشياء من لعبة كرة المضرب إلى البيليارد.

أسئلة للتفكير

لماذا تبدأ السيارة الساكنة بالحركة للأمام بعد أن تصدمها سيارة متحركة؟ ما هي أوجه الحركة التي تنتقل بين السيارات عند اصطدامهم؟ لماذا تهتز سيارتك أكثر عندما تصطدم بها سيارة بها شخصان بالغان كبيران بدلا من سيارة بها طفل واحد صغير؟ ماذا سيحدث إذا كان لسيارات التصادم صدّامات فولاذية صلبة بدلا من مطاطية مرنة؟ لماذا تبدأ سيارتك بالدوران نتيجة التصادم في أحيان كثيرة، وما الذي يجعلها تستمر في الدوران؟

تجارب يمكن القيام بها

ضع عملة نقدية على سطح طاولة ملساء ثم انقر بإصبعك عملة نقدية أخرى مماثلة لكي تنزلق على الطاولة وتصطدم بالعملة الساكنة مباشرة. ماذا يحدث؟ قم بهذه التجربة مرة أخرى، ولكن الآن استخدم عملتين نقديتين لهما كتل مختلفة. كيف يختلف التصادم؟ هل يهُم أي من هذه العملات النقدية تصطدم بالأخرى؟

الآن قم بصفّ العديد من العملات النقدية المتماثلة بحيث تتلامس، وزحلقْ عملة أخرى على أحد طرفي هذا الصف. كيف يؤثّر هذا التصادم على العملة النقدية التي كانت في الأصل متحركة؟ وكيف يؤثّر على صف العملات؟ ما هو الشيء الذي انتقل بين العملات بالتصادم؟

الآن انصب عملة على حافتها وانقرها بحيث تجعلها تدور بسرعة. هل أعطيتها شيئاً ما جعلها تستمر في الدوران؟ لماذا تتوقف العملة عن الدوران في نهاية الأمر؟

السير للأمام: كمية الحركة الخطية

سيارات التصادم هي مركبات صغيرة تعمل بالكهرباء يمكنها أن تدور بسرعة في حيز صغير وهي محمية من جميع جوانبها بصدّامات مطاطية. كل سيارة لها وسيلتا تحكم فقط: دوّاسة تشغّل محركها ومقود قيادة يتحكم في الاتجاه الذي يدفع فيه المحرك السيارة. بما أن حجم السيارة صغير، تشكل كتلة راكبي السيارة معظم كتلة السيارة الكلية وكتلتها الدورانية. تخيّل أنك للتوّ جلست في إحدى هذه السيارات وربطت حزام الأمان. الأشخاص الآخرون أيضا ركبوا سياراتهم، في العادة شخص واحد في كل سيارة، وبدأت الجولة.

نظراً لحرية سيارتك في الحركة والدوران، تدرك سريعاً قصورها الذاتي الانتقالي والدوراني. قصور السيارة الذاتي الانتقالي يجعل من الصعب البدء في تحريكها أو إيقافها، وقصورها الذاتي الدوراني يجعل من الصعب دورانها أو إيقاف دورانها. على الرغم من أننا رأينا هذين النوعين من القصور الذاتي من قبل، دعنا ننظر لهما مرة أخرى وكيف يؤثران على سيارة التصادم. هذه المرة، سنرى أنهما مرتبطان بكميتين محفوظتين جديدتين - كمية الحركة الخطية وكمية الحركة الزاوية. يبدو أن الطاقة ليست هي الكمية المحفوظة الوحيدة في الطبيعة!

عندما تصطدم سيارات التصادم السريعة ببعضها، فإنها تتبادل أكثر من مجرد الطاقة. الطاقة عديمة الاتجاه - هي ليست كمية متجهة - ولكن يبدو أن هذه السيارات تتبادل كمية حركة لها اتجاه مرتبط بها. على سبيل المثال، إذا صُدمت سيارتك مباشرة بسيارة تتحرك في اتجاه اليمين، فإن سيارتك ستنحرف بعض الشيء نحو اليمين استجابة لذلك. تستقبل سيارتك كمية متجهة من الحركة من السيارة الأخرى، والتي هي كمية متجهة محفوظة تعرف بكمية الحركة الخطية.

كمية الحركة الخطية، عادة تسمى بكمية الحركة فقط، هي مقياس للحركة الانتقالية للجسم - أي ميله للاستمرار في الحركة في اتجاه معين. يمكننا القول تقريباً بأن كمية حركة سيارتك تحدد اتجاه حركتها ومقدار الصعوبة في جعلها تتحرك بسرعتها الحالية.

كمية حركة السيارة تساوي كتلتها مضروبة في سرعتها، ويمكن كتابة ذلك كمعادلة لفظية:

كمية الحركة = الكتلة × السرعة (١,٣,٢)

ورمزيا:

$$p = m \cdot v$$

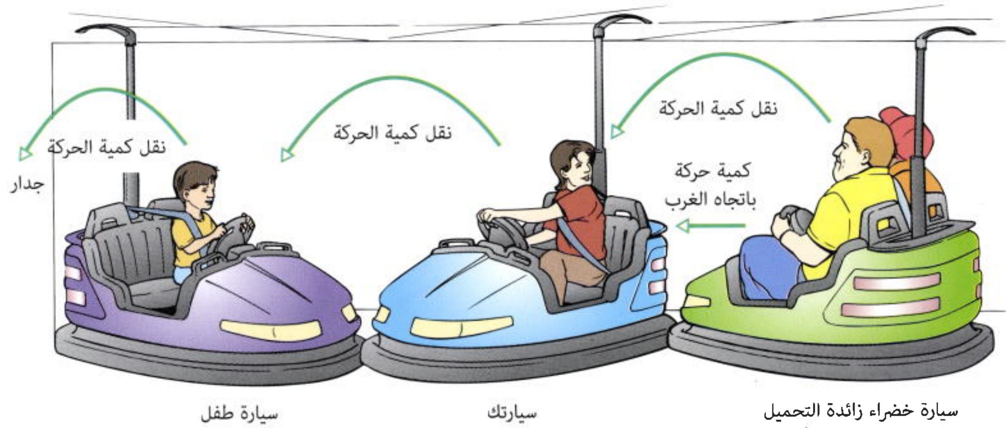
وفي لغة الحياة اليومية: من الصعب إيقاف شاحنة سريعة.

لاحظ أن كمية الحركة هي كمية متجهة، وأن لها نفس اتجاه السرعة. كما قد نتوقع، كلما تحركت سيارتك بسرعة أكبر أو كلما كان لها كتلة أكبر، زادت كمية حركتها في اتجاه حركتها. وحدة كمية الحركة في النظام العالمي للوحدات SI هي الكيلوجرام-متر-لكل-ثانية (اختصارا kg·m/s).

بالنسبة للفيزيائيين، تُعد الكميات المحفوظة كنوزاً نادرة تسهل فهم حركات معقدة. ومثل جميع الكميات المحفوظة، كمية الحركة لا يمكن إنشاؤها أو إفناؤها. فقط يمكن نقلها بين الأجسام. تلعب كمية الحركة دوراً أساسياً جداً في سيارات التصادم: الهدف من جعل السيارات تصطدم ببعضها هو للاستمتاع بانتقال كمية الحركة. عند كل اصطدام، تنتقل كمية الحركة من سيارة لأخرى فتتغير فجأة سرعتها أو اتجاهها أو كلاهما معا. طالما أن انتقالات كمية الحركة هذه ليست عنيفة، فإن الجميع سيقضي أوقاتاً ممتعة.

أوقفت سيارتك، فسرعتها صفر وكمية حركتها صفر. لجعلها تتحرك مرة أخرى، يجب أن يقوم شيء ما بنقل كمية حركة لسيارتك. مع أنك تستطيع أن تضغط على الدواسة وتجعل المحرك ينقل كمية حركة تدريجيا من الأرض لسيارتك، إلا أن هذا ليس ممتعاً كثيرا. بدلا من ذلك، ستسمح للسيارة الخضراء المحملة بشخصين بدينين مكشرين أن تصطدم بك بسرعة خطرة جدا (شكل ١,٣,٢).

كانت السيارة الخضراء متجهة نحو الغرب، وخلال لحظات تتحرك سيارتك باتجاه الغرب أيضا، بينما تباطأت السيارة



شكل ١,٣,٢: صُدمت سيارتك بسيارة مسرعة ذات كتلة كبيرة ولها كمية حركة باتجاه الغرب. معظم كمية الحركة تلك والمتجهة للغرب انتقلت لسيارتك. اصطدمتَ بسيارة طفل ونقلت كمية الحركة المتجهة غربا لها، ثم اصطدمت سيارة الطفل بالحائط ونقلت كمية الحركة المتجهة غربا للحائط.

الخضراء بشكل ملحوظ. قبل أن تتعافى من الصدمة، تصطدم سيارتك المتجهة غربا بسيارة طفل وتتباطأ سيارتك بشكل مفاجئ. أخيرا، تقف سيارة الطفل بسبب تصادمها بالحائط. بالرغم من نظرات والدي الطفل غير الراضية، فإنه لم يحدث أي أذى. إجمالا، تدفقت كمية الحركة باتجاه الغرب من عربة البدناء إلى سيارتك، ثم انتقلت لسيارة الطفل، ثم إلى الحائط. لم تُنشأ أو تُفنى أي كمية حركة؛ فقط استمتعتم جميعا بنقلها من سيارة لأخرى.

تحقق من فهمك # ١: عالق على الجليد (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

افترض أنك عالق في منتصف بحيرة مجمّدة، سطحها أملس جدا، بحيث لا تستطيع الحصول على أي احتكاك التصاق. تنزع حذاءك وترميه باتجاه الشاطئ الجنوبي، فتجد نفسك تتحرك باتجاه الشاطئ الشمالي، وبعد قليل تستطيع الخروج من البحيرة. لماذا نجحت هذه الخطة؟

دقق في أرقامك #١: اتبع ذاك القطار! (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

يهرب اللصوص بركوب قطار له أربع مقطورات وأنت تحاول الإمساك بهم. القطار له كتلة مقدارها 20,000kg ويتحرك للأمام بسرعة 22 m/s (80km/h or 50mph). ما هي كمية حركة القطار؟

تبادل كمية الحركة أثناء التصادم: دفع القوة

تنتقل كمية الحركة إلى سيارة عن طريق إعطائها «دفع القوة»، أي قوة تؤثر عليها لفترة معينة من الوقت. عندما يدفع المحرك وتدفع الأرض سيارة التصادم الخاصة بك إلى الأمام لبضع ثوان، فإنهما يقومان بإعطاء سيارتك دفع القوة وينقلان كمية حركة لها. دفع القوة هذا هو التغير في كمية حركة سيارتك ويساوي حاصل ضرب القوة المبذولة على السيارة في الفترة الزمنية التي أثرت فيه عليها. يمكن أن نكتب هذه العلاقة بالمعادلة اللفظية:

دفع القوة = القوة × الزمن (٢,٣,٢)

ورمزيا:

$$\Delta p = F \cdot t$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما زادت شدة دفعك وزمن دفعك للأمام لزلاجة عند بدء السباق، كانت لها كمية حركة أكبر عندما تبدأ بالانزلاق للأسفل من أعلى الهضبة.

كلما زادت القوة أو طال الزمن الذي تؤثر فيه هذه القوة، زاد دفع القوة وزاد التغير في كمية حركة سيارتك. تذكر أن دفع القوة، مثل كمية الحركة نفسها، هو كمية متجهة وله اتجاه. إذا لم تحسن التوجيه وتحصلت على دفع القوة من الأرضية جعلك تصطدم بالحائط، فلا تقل أنك لم تُنذر!
إن القوى المختلفة التي تؤثر لفترات زمنية مختلفة يمكنها أن تنقل نفس كمية الحركة للسيارة:

دفع القوة = **قوة كبيرة** × زمن قصير = قوة صغيرة × **زمن طويل**. (٢،٣،٢)

هكذا يمكنك أن تجعل سيارتك تتحرك بكمية حركة معينة للأمام إما بجعل المحرك والأرضية يقومان بدفعها بقوة صغيرة للأمام لمدة طويلة، أو بجعل السيارة الخضراء المصطدمة تدفعها بقوة كبيرة للأمام لمدة قصيرة.

الآن يمكننا أن نوضح لماذا سيارات التصادم لها صدامات مطاطية. إذا كانت الصدامات من الفولاذ الصلب، فإن التصادم بين السيارة الخضراء وسيارتك سيستمر للحظة فقط، وهذا سيتضمن قوة هائلة للأمام. ستحتاج عندها لرباط مقوىّ لرقبتك وخدمات محامي الإصابات الشخصية. على أية حال، لا تحب مدن الملاهي الدعاوى القضائية فتحدد بعقلانية قوى تصادم السيارات. لتقوم بهذا، تستخدم الصدامات المطاطية وسيارات بطيئة الحركة نوعا ما.

ومع هذا، يمكنك أن تحصل على تصادم جيد عندما تصطدم رأسيا مع سيارة أخرى. في هذه الحالة ستبدأ سيارتاكما بكميتي حركة متعاكستين، والتصادمات تقوم بتحويل كميات الحركة تلك تقريباً بين السيارتين.

في زمن قليل جداً ستنتقل من التوجه للأمام إلى التوجه للخلف. إن مقدار دفع القوة، والذي تسبب في انعكاس الحركة كبير جدا، لأنه لم يوقف حركتك للأمام فحسب، بل تسبب أيضاً في بدء حركتك للخلف.

لماذا يجب أن تكون كمية الحركة كمية محفوظة؟ هي محفوظة بسبب قانون نيوتن الثالث للحركة. عندما تبذل سيارة قوة على سيارة أخرى لفترة معينة من الزمن، فإن السيارة الثانية تبذل قوة مساوية ولكن معاكسة في الاتجاه على السيارة الأولى ولنفس الفترة الزمنية. وبسبب طبيعة هاتين القوتين المتساويتين والمتعاكستين في الاتجاه، فإن السيارات التي يدفع بعضها البعض تتحصل على دفع قوى متساوية في المقدار ولكن متعاكسة في الاتجاه. بما أن كمية الحركة التي تكتسبها إحدى السيارتين مساوية لكمية الحركة التي فقدتها السيارة الأخرى، فإننا نقول أن كمية الحركة انتقلت من إحدى السيارتين إلى الأخرى.

كلما كانت كتلة سيارة أكبر كان التغير في سرعتها نتيجة لانتقال كمية حركة أقل. لهذا السبب لا تتوقف السيارة الخضراء تماما عندما تصطدم بسيارتك، بينما تتسارع سيارتك بشكل مفاجئ. تمتلك السيارة الخضراء كمية حركة كبيرة للأمام بحيث يؤدي نقل جزء منها لسيارتك إلى تغير كبير في سرعتها. مثل الذبابة عند اصطدامها بالزجاج الأمامي لسيارة، فإن سيارة التصادم التي لك تقوم بمعظم التسارع.

الكمية المحفوظة: كمية الحركة — **منقولة عن طريق: دفع القوة**

كمية الحركة: مقياس الحركة الانتقالية للجسم – ميله للاستمرار في الحركة في اتجاه معيّن. كمية الحركة هي كمية متجهة، أي أن لها اتجاه. ليس لها شكل كامن، وبالتالي لا يمكن إخفاؤها؛ كمية الحركة = الكتلة × السرعة.

دفع القوة: الوسيلة الميكانيكية لنقل كمية الحركة؛ دفع القوة = القوة × الزمن.

معتقدات خاطئة شائعة: كمية الحركة والقوة

المعتقد الخاطئ:

يحمل الجسم المتحرك ذو الكتلة الكبيرة قوة معه – «قوة كمية حركته».

القرار:

بالرغم من أن دفع القوة الذي ينقل كمية الحركة يتضمن قوة، إلا أن كمية الحركة ذاتها لا قوة لها. يحمل الجسم المتحرك كمية حركة فقط وليس قوة. والأكثر أهمية، أن الجسم المنزلق حر من أي محصلة للقوة. ولكن عندما يصطدم ذلك الجسم بعائق، فإنهما سيتبادلان كميات الحركة عن طريق دفع القوة ودوافع القوى هذه هي التي تتضمن قوى.

تحقق من فهمك # ٢: طرحهم جميعا

(للإجابة، انظر صفحة ٧١)

عندما يصطدم كيس مملوء بالفول بحائط فإنه ينقل جميع كمية حركته المتجهة للأمام للحائط ويتوقف عن الحركة. عندما تصطدم كرة مطاطية بالحائط فإنها تنقل جميع كمية حركتها المتجهة للأمام، ثم تتوقف، ثم ترتد. أثناء الارتداد تنقل المزيد من كمية حركتها المتجهة للأمام للحائط. إذا أردت أن تطرح وتد البولنج في مهرجان المدينة الترفيهي، فأيهما سيكون مقذوفاً أكثر فعالية: الكرة المطاطية أم كيس الفول، على فرض أن لهما نفس الكتلة وتقذفهما بنفس السرعة؟

دقق في أرقامك # ٢: أوقف ذلك القطار!

(للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

تعطل محرك القطار الذي تطارده (انظر دقق في أرقامك #١)، ولكن القطار مازال يتحرك للأمام. لإيقافه، تقوم بالإمساك بالمقطورة الخلفية وتبدأ بغرز كعوب حذائك في الأرض. القوة الخلفية المبذولة على القطار مقدارها 200N. كم ستستغرق من الوقت لإيقاف القطار؟

الدوران في دوائر: كمية الحركة الزاوية

عندما تبدأ سيارات التصادم بالدوران أثناء التصادمات، فإنها تتبادل كمية محفوظة أخرى أيضاً. مثل كمية الحركة، هذه الكمية المحفوظة الأخرى هي كمية متجهة ولكنها الآن مرتبطة بالسرعة الزاوية واتجاه الحركة الدورانية حول نقطة ارتكاز معينة. فمثلا، عندما تتلقى سيارتك ضربة خفيفة من سيارة تدور حولك باتجاه عقارب الساعة، فإن حركة سيارتك الدورانية أو التفافها تتزحزح بعض الشيء باتجاه عقارب الساعة كرد فعل. تتلقى سيارتك كمية متجهة للحركة من السيارة الأخرى، وتعرف هذه الكمية المتجهة المحفوظة بكمية الحركة الزاوية.

كمية الحركة الزاوية هي مقياس حركة الجسم الدورانية – ميله للاستمرار في الدوران حول محور معيّن. ببساطة، كمية حركة سيارتك الزاوية توضح اتجاه دورانها ومدى صعوبة جعلها تبدأ بالدوران بسرعتها الزاوية الحالية. كمية حركة السيارة الزاوية تساوي كتلتها الدورانية مضروبا في سرعتها الزاوية، ويمكن كتابة ذلك كمعادلة لفظية:

كمية الحركة الزاوية = الكتلة الدورانية × السرعة الزاوية (٤،٣،٢)

ورمزيا:

$$L = I \cdot \omega$$

وفي لغة الحياة اليومية:من الصعب وقف دوامة خيول متحركة.

لاحظ أن كمية الحركة الزاوية هي كمية متجهة وأن لها نفس اتجاه السرعة الزاوية. كلما زادت سرعة دوران سيارتك أو زادت كتلتها الدورانية، زادت كمية حركتها الزاوية في اتجاه سرعتها الزاوية. وحدة كمية الحركة الزاوية في النظام العالمي SI هي الكيلوجرام-متر^2-لكل-ثانية (اختصارا $kg \cdot m^2/s$).

كمية الحركة الزاوية هي كمية محفوظة أخرى، فلا يمكن أن تُنشأ أو تُفنى؛ بل يمكنها فقط الانتقال بين الأجسام. لكي تبدأ

سيارتك بالدوران، لا بد من وجود شيء ينقل لها كمية حركة زاوية، وعندها ستستمر سيارتك بالدوران إلى أن تنقل كمية الحركة الزاوية هذه لمكان آخر. ولكن لدراسة كمية الحركة الزاوية بشكل صحيح، يجب أن نختار نقطة الارتكاز التي سيحدث حولها كل هذا الدوران. في الوضع الحالي، الاختيار الأمثل لنقطة الارتكاز هو مركز الكتلة الابتدائي لسيارتك.

إن سيارتك ساكنة مرة أخرى، لذا فإن سرعتها الزاوية صفر وكمية حركتها الزاوية صفر. فجأة، تمر بجانبك سيارة أرجوانية وتصطدم بسيارتك بشكل عرضي غير مباشر (شكل ٢,٣,٢). بما أن السيارة الأرجوانية كانت تدور حول سيارتك عكس اتجاه عقارب الساعة، فكمية حركتها الزاوية كانت باتجاه عكس عقارب الساعة حول نقطة الارتكاز. أدى تصادمها لانتقال بعض من كمية حركتها الزاوية إلى سيارتك، والتي تبدأ هي ذاتها بالدوران عكس اتجاه عقارب الساعة. بما أن السيارة الأرجوانية فقدت بعضاً من كمية حركتها الزاوية، فإنها ستدور حول سيارتك بسرعة أقل. ستبدأ سيارتك بالتوقف عن الدوران تدريجياً حيث تقوم عجلاتها والاحتكاك بنقل كمية الحركة الزاوية للأرضية والأرض. عموما، لم تُنشأ كمية حركة زاوية ولم تُفنى أثناء التصادم. بدلا من ذلك، تم نقلها من السيارة الأرجوانية إلى سيارتك ثم إلى الأرض.

تحقق من فهمك #٣: عوداً سعيداً دائما (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

كثيراً ما تُطلق الأقمار الصناعية وهي تدور حول نفسها لإعطائها استقراراً إضافيا. عندما يزور رواد الفضاء هذه الأقمار بعد بضع سنين، يجدون أنها مازالت تدور حول نفسها. لماذا لا تتوقف الأقمار الصناعية عن الدوران حول نفسها؟

دقق من أرقامك #٣: هل تريد أخذ لفـّة؟ (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

الأقمار الصناعية التي في حالة دوران تكون مستقرة جدا. افترض أن رواد الفضاء الذين يطلقون قمراً صناعياً معيّناً قرّروا أن يزيدوا من سرعته الزاوية خمسة أضعاف. كيف سيؤثر ذلك التغيير على كمية الحركة الزاوية للقمر الصناعي؟

شكل ٢,٣,٢: بما أن السيارة الأرجوانية تدور حول سيارتك عكس اتجاه عقارب الساعة، فإن كمية حركتها الزاوية تكون بعكس اتجاه عقارب الساعة. عندما تصطدم بسيارتك، ستنقل بعضاً من تلك الكمية الحركية الزاوية إلى سيارتك. بسبب هذا الانتقال، فإن السيارة الأرجوانية ستتوقف عن الدوران بسرعة بينما ستبدأ سيارتك بالدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة.



الضربات العابرة: دفع القوى الزاوي

تنتقل كمية الحركة الزاوية إلى سيارة عن طريق إعطائها دفع قوة زاوي، أي عزم دوراني يُبذل عليها لفترة زمنية معينة. عندما تصطدم السيارة الأرجوانية بسيارتك وتبذل عليها عزماً دورانياً لفترة وجيزة، فإنها تعطي سيارتك دفع قوة زاوياً وتنقل إليها كمية حركة زاوية. دفع القوة الزاوي هذا، هو التغير في كمية حركة سيارتك الزاوية ويساوي حاصل ضرب عزم الدوران المبذول على سيارتك بالفترة الزمنية الذي أثر فيها ذلك العزم الدوراني عليها. هذه العلاقة يمكن أن تكتب كمعادلة لفظية:

دفع القوة الزاوي = عزم الدوران × الزمن (٥,٣,٢)

ورمزيا:

$$\Delta L = \tau \cdot t$$

وفي لغة الحياة اليومية: لجعل دوامة الخيل تدور بسرعة، يجب أن تلفـّها بقوة ولمدة طويلة.

كلما زاد عزم الدوران أو زاد زمن تأثيره، زاد دفع القوة الزاوي وزاد معه التغير في كمية حركة سيارتك الزاوية. مرة أخرى، دفع القوة الزاوي هو كمية متجهة وله اتجاه.

لو كانت السيارة الأرجوانية تدور حول سيارتك باتجاه عقارب الساعة عندما ضربتها ضربة عابرة، لكان دفع القوة الزاوي في الاتجاه المعاكس ولكنت ستدور في الاتجاه الآخر.

عزوم الدوران المبذولة لفترات زمنية مختلفة يمكنها أن تنقل نفس كمية الحركة الزاوية لسيارة:

دفع القوة الزاوي = **عزم دوراني كبير** × زمن قصير = عزم دوراني صغير × **زمن طويل**. (٦،٣،٢)

وهكذا يمكنك أن تجعل سيارتك تدور بكمية حركة زاوية معينة إما بجعل المحرك والأرض يديرانها بعزم دوراني صغير لفترة زمنية طويلة أو بجعل السيارة الأرجوانية المصطدمة بها تديرها بعزم دوراني كبير لفترة زمنية قصيرة. فكما هو الحال في كمية الحركة الخطية، فإن الانتقالات المفاجئة لكمية الحركة الزاوية قد تؤدي لكسر الأشياء، لذا فإن السيارات مصممة لتحد من عزوم دوران التصادم لمستويات معقولة. رغم ذلك، قد تجد نفسك تبحث عن الكيس المخصص لاستخدام المصابين بدُوار الحركة بعد بضع من التصادمات الدورانية.

لماذا يجب أن تكون كمية الحركة الزاوية كمية محفوظة؟ مثل كمية الحركة الخطية، فإن كمية الحركة الزاوية محفوظة بسبب قانون نيوتن الثالث للحركة. في هذه الحالة، نـحن نشير لقانون نيوتن الثالث للحركة الدورانية: إذا أثر جسم بعزم دوراني على جسم آخر، فإن الجسم الآخر سيؤثر بعزم دوراني مساوٍ لكن معاكس في الاتجاه على الجسم الأول.

قانون نيوتن الثالث للحركة الدورانية

لكل عزم دوراني يبذله جسم على جسم آخر، يوجد عزم دوراني آخر مساوٍ في المقدار ومعاكس في الاتجاه يبذله الجسم الآخر على الجسم الأول.

عندما تبذل سيارة عزماً دورانياً على سيارة أخرى لفترة معينة من الزمن، فإن السيارة الأخرى تبذل عزماً دورانياً مساوياً في المقدار ومعاكساً في الاتجاه على السيارة الأولى لنفس الفترة الزمنية بالضبط، بسبب طبيعة عزمي الدوران من حيث أنهما متساويان ومتعاكسان، فإن السيارات التي تبذل عزوم دوران على بعضها البعض تتلقى دفعاً قويًا زاوياً متساوياً في المقدار ولكن معاكساً في الاتجاه. بما أن كمية الحركة الزاوية التي اكتسبتها إحدى السيارات مساوية تماما لكمية الحركة الزاوية المفقودة من السيارة الأخرى، فإننا نقول أن كمية الحركة الزاوية تنتقل من سيارة لأخرى.

بما أن كمية الحركة الزاوية للسيارة تعتمد على كتلتها الدورانية، فإن سيارتين مختلفتين يمكنهما أن تدورا بسرعتين زاويتين مختلفتين على الرغم من أن لهما كميتَي حركة زاوية متماثلة. على سبيل المثال، عندما تصدم السيارة الأرجوانية السيارة الخضراء ذات الحمولة الزائدة وتنقل لها كمية حركة زاوية، فإن الكتلة الدورانية الكبيرة للسيارة الخضراء تجعلها تدور ببطء نسبياً. يحدث نفس هذا السلوك في كمية الحركة الخطية، حين تؤثر كتلة السيارة على سرعة سيرها عندما تُعطى كمية معينة من كمية الحركة الخطية، لكن بينما لا تستطيع سيارة تصادم أن تغير من كتلتها، لكنها تستطيع تغيير كتلتها الدورانية.
إذا تمكنت من ذلك أثناء دورانها فإن كمية الحركة الزاوية لن تتغير، بل ستتغير سرعتها الزاوية!

لرؤية هذا التغير في السرعة الزاوية، تأمل السيارة الخضراء ذات الحمولة الزائدة، أصيب راكباها الضخمان بخيبة أمل من اللعبة لأن كتلتهما وكتلتهما الدورانية الكبيرة منعتهما من الشعور بالصدمات العنيفة والدوران السريع التي استمتعت أنت بها. فجأة تطرأ لهما فكرة رائعة، بينما تدور سيارتهما ببطء، يقعد أحد الراكبين في حجر الآخر ويجلسان بالقرب من مركز كتلة السيارة. بإعادة توزيع كتلة السيارة بهذه الطريقة، فإنهما يقلصان كتلة السيارة الدورانية الإجمالية وتبدأ السيارة بالدوران أسرع من ذي قبل.

بما أن كتلة السيارة الخضراء قد تم إعادة توزيعها، فهي لم تعد جسما صلبا حر الدوران والذي يشمله قانون نيوتن الأول للحركة

الدورانية. ولكنها تدور بحرية فيشملها قانون أكثر عموما ومساوٍ في الفائدة: الجسم الذي لا يتعرض لأي عزم دوراني خارجي له كمية حركة زاوية ثابتة. بما أن كتلة السيارة الدورانية صغرت، فإن سرعتها الزاوية يجب أن تزيد للمحافظة على كمية الحركة الزاوية ثابتة. هذا هو الذي يحدث. هذا التأثير بتغير الكتلة الدورانية هو الذي يفسر كيف يمكن لمتزلجة على الجليد أن تحصل على سرعة زاوية هائلة بضم أطرافها لتكون جسماً دورانياً نـحيفاً على الجليد (شكل ٣,٣,٢).

الكمية المحفوظة: كمية الحركة الزاوية **تنتقل من خلال: دفع القوة الزاوي**

كمية الحركة الزاوية: هي مقياس لكتلة الجسم الدورانية – ميله للاستمرار في الدوران حول محور معيّن. كمية الحركة الزاوية هي كمية متجهة، أي أن لها اتجاه. ليس لها شكل كامن وبالتالي لا يمكن أن تكون مخفية؛

كمية الحركة الزاوية = الكتلة الدورانية × السرعة الزاوية.

دفع القوة الزاوي: الوسيلة الميكانيكية لنقل كمية الحركة الزاوية؛

دفع القوة الزاوي = عزم الدوران × الزمن.

ملخص قوانين نيوتن للحركة الدورانية

١. الجسم الصلب غير المترنح وغير المتعرض لأي عزم دوراني خارجي يدور بسرعة زاوية ثابتة، فيلف بكميات متساوية في فترات زمنية متساوية حول محور دوران مثبت.

٢. عزم الدوران المبذول على جسم غير مترنح يساوي حاصل ضرب الكتلة الدورانية لهذا الجسم في تسارعه الزاوي. يشير التسارع الزاوي في نفس اتجاه عزم الدوران.

٣. لكل عزم دوراني يؤثر به جسم على آخر، فإنه يوجد عزم دوراني آخر مساوٍ في المقدار ومعاكس في الاتجاه يؤثر به الجسم الآخر على الجسم الأول.

ملاحظة: هذه القوانين هي النظائر الدورانية للقوانين الانتقالية المذكورة في صفحة ٤٢

تحقق من فهمك # ٤: لف دوامة الخيل (merry-go-round) (للإجابة، انظر صفحة ٧١)

يبدأ شخص ساكن ابتداء بتدوير الدوامة ويعود بعدها لسكونه. إذا كانت كمية الحركة الزاوية فعلا محفوظة، ما هو مصدر كمية الحركة الزاوية التي تمتلكها الدوامة الآن؟

دقق في أرقامك # ٤: دُر بعيدا! (للإجابة، انظر صفحة ٧٣)

ما هي الزيادة في الوقت التي سيحتاجها رواد الفضاء الذين يطلقون القمر الصناعي في «دقق في أرقامك # ٣» ليجعلوه يصل للسرعة الزاوية الأكبر، إذا استعملوا العزم الدوراني المخطط له ابتداء؟

الكميات المحفوظة الثلاثة

عندما تقود سيارة تصادمك في الحلبة، فإن حركتها محكومة لحد كبير بثلاث كميات محفوظة: الطاقة، وكمية الحركة الخطية، وكمية الحركة الزاوية (جدول ١,٣,٢). بينما يمكنك تبادل هذه الكميات مع الأرض وشركة الكهرباء من خلال توجيه سيارتك أو بدء تشغيل محركها، إلا أن أكثر التبادلات إثارة هي التي تتضمن الاصطدامات.

مؤسسة ستيفن سوتو/دويومو للتصوير.



شـكل ٣,٣,٢: عندمـا تضـم كريسـتي ياماقوتشي ذراعيْها فإنها تقلص من كتلتها الدورانية. بما أنها لا تواجه أي عزم دوراني، فإن كميـة حركتها الدورانية لا بد أن تظل ثابتة وستبدأ بالدوران بسرعة أكبر.

كلما دفعت سيارتك سيارة أخرى للأمام، قامت سيارتك بشغل على السيارة الأخرى ونقلت إليها طاقة. وكلما قامت سيارتك بدفع سيارة أخرى للشمال للحظة وجيزة، أعطت سيارتك للسيارة الأخرى دفع قوة باتجاه الشمال ونقلت إليها كمية حركة باتجاه الشمال. وكلما أدارت سيارتك سيارة أخرى باتجاه عقارب الساعة حول مركز كتلتها، أعطت سيارتك السيارة الأخرى دفع قوة زاوي باتجاه عقارب الساعة ونقلت إليها كمية حركة زاوية باتجاه عقارب الساعة. هذه التبادلات في الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية تكون سريعة وعنيفة وتجعل هذه اللعبة مثيرة.

جدول ١،٣،٢ : كميات الحركة المحفوظة الثلاثة وآليات انتقالهم

الكمية المحفوظة	آلية انتقالها
الطاقة	الشغل
كمية الحركة الخطية	دفع القوة
كمية الحركة الزاوية	دفع القوة الزاوي

الكمية	وحدة النظام العالمي *SI*	وحدة النظام البريطاني	*SI* ← النظام البريطاني	النظام البريطاني ← *SI*
كمية الحركة الخطية	كيلوجرام-متر-لكل-ثانية (kg·m/s)	(Pound –foot-per-second (lbm·ft/s)	1kg·m/s = 7.2329 lbm·ft/s	lbm·ft/s = 0.13862 kg·m/s
كمية الحركة الزاوية	كيلوجرام-متر^2-لكل-ثانية (kg·m^2/s)	Pound –foot^2-per-second (lbm·ft^2/s)	1kg·m^2/s = 23.730 lbm·ft^2/s	1lbm·ft^2/s = 0.042140 kg·m^2/s

تحقق من فهمك #٥ : ضرب الحائط (للإجابة ، انظر صفحة ٧١)

أنت تقود سيارتك للخلف للخروج من موقف وعن غير قصد اصطدمت بحائط خرساني. الحائط لا يتحرك وسيارتك تكبدت بعض الضرر. هل نقلت سيارتك أي طاقة أو كمية حركة للحائط؟

الطاقة الكامنة والتسارع

قبل أن تنتهي الجولة بقليل، تلاحظ أن هناك منطقة منخفضة في الأرضية. بعد سنين من الاستخدام، حصل لسطح الأرضية المعدني انبعاج على شكل تجويف مضغوط للأسفل وتلاحظ أن سيارات التصادم تتدحرج طبيعيا في هذا التجويف وتتسارع باتجاه قاعه. لقد رأينا من قبل هذا الميل للتسارع للأسفل في المنحدرات، ولكن لننظر إليه الآن بدلالة الطاقة: تتسارع السيارة دائما في الاتجاه الذي يقلل طاقتها الكامنة بأسرع ما يمكن. بما أن الطاقة الكامنة الوحيدة للسيارة الواحدة هي طاقة الجاذبية الكامنة، فإنها تتسارع بطريقة ما للتقليل من طاقة جاذبيتها الكامنة بأسرع ما يمكن: لأسفل الطريق الذي له أقصى انحدار ليصل لقاع التجويف.

هذا السلوك، كون التسارع في الاتجاه الذي يقلل من الطاقة الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن، هو سلوك كوني. هناك علاقة بين الطاقة الكامنة والقوى، لذا فإن هذه القاعدة هي في الحقيقة فقط طريقة لتحديد اتجاه محصلة القوة على جسم ما أو بعض أجزائه. يتسارع الجسم في اتجاه محصلة القوة عليه، والذي هو أيضاً الاتجاه الذي يقلل من طاقته الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن. هذه القاعدة هي طريقة مفيدة لتحديد كيف ستسير الحركة: في أي اتجاه سيقفز زنبرك، أو ينقلب مقعد، أو تتدحرج سيارة تصادم. سوف نستخدم هذه القاعدة كثيرا في هذا الكتاب.

الطاقة الكامنة والتسارع

يتسارع الجسم في الاتجاه الذي يؤدي لتقليل طاقته الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن.

تحقق من فهمك # ٦: التوجه للأسفل (للإجابة، انظر صفحة ٧٦)

عندما تقوم بسحب طفل يجلس على أرجوحة للخلف ثم تتركه، في أي اتجاه سيتسارع الطفل؟

خاتمة الفصل الثاني

في هذا الفصل تناولنا الدوران والأجسام المتصادمة ودرسنا القوانين الفيزيائية التي تصف حركاتها. في قسم الأرجوحات، درسنا القصور الذاتي الدوراني ورأينا كيف أن عزم الدوران يحدث تسارعاً زاويا. كما لاحظنا كم هو مفيد فصل الحركة الدورانية للجسم عن حركته الانتقالية. وفي قسم العجلات، ناقشنا نوعاً آخر مهماً من أنواع القوى، ألا وهو الاحتكاك، وأيضا نوعاً جديداً من الطاقة وهي الطاقة الحرارية – الطاقة المرتبطة بالحرارة ودرجة الحرارة. وفي قسم سيارات التصادم، عرّفنا كميتين فيزيائيتين محفوظتين إضافيتين: كمية الحركة وكمية الحركة الزاوية. كما سنرى، فإن تتبع اتجاهات تدفق الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية بين الأجسام غالبا ما يساعد في فهم كيفية عمل هذه الأجسام.

تفسير: دوران طبق فطيرة

بما أن الطبق المتوازن له قصور ذاتي دوراني، فإنه سيتطلب وجود عزوم دورانية لبدئه بالدوران وإيقافه. عندما تلف الطبق بيدك، فإن عزم الدوران الذي تبذله يعطي الطبق دفع قوة زاوياً ويجعله يدور بكمية حركة زاوية معينة. إذا كانت نقطة الارتكاز عديمة الاحتكاك حقيقة ولم يوجد أي مقاومة للهواء، فإن الطبق سيدور لا نهائيا لأنه سيكون غير قادر على التخلص من كمية حركته الزاوية. ولكن الاحتكاك عند نقطة الارتكاز يبذل عزماً دورانياً صغيراً ولكنه مهم حيث أنه يعارض حركة الطبق ويجعله يتباطأ تدريجيا. عندما يقوم عزم الدوران الناشئ من الاحتكاك بنقل كمية الحركة الزاوية من الطبق إلى قلم الرصاص، والمقعد، والأرض، فإن الطبق سيدور ببطء أكثر وأكثر إلى أن يتوقف في نهاية الأمر. كلما كانت نقطة الارتكاز أكثر حدة ومساحة التلامس بين هذه النقطة والطبق صغيرة، قلّ عزم الدوران الناتج من الاحتكاك والذي يؤثر على الطبق وطالت فترة دورانه.

من السهل موازنة الطبق طالما أنه مقلوب. كون حافة الطبق منسدلة للأسفل، فإن الطبق له طاقة جاذبية كامنة قليلة نسبيا ومن المدهش أنه يتزن. إذا بدأ بالميل لجهة، فإن متوسط ارتفاع الطبق سيزيد وتزيد معه طاقته الجاذبية الكامنة. بما أن الأجسام بطبيعتها تتسارع في أي اتجاه يمكنها من تقليل طاقتها الجاذبية الكامنة بأسرع وقت ممكن، فإن الطبق المقلوب سريعاً ما يميل للوضع المستوي بعد اضطرابه. على النقيض من ذلك، من المستحيل تقريباً موازنة الطبق المعتدل على سن لأن أي ميل سيخفض من طاقته الجاذبية الكامنة وسيؤدي سريعا لكارثة. سوف ننظر لاحقا في هذه التأثيرات المسببة للاستقرار وعدم الاستقرار بعناية أكبر في هذا الكتاب.

ملخص الفصل

كيفية عمل لعبة الميزان

لعبة الميزان هي لعبة دورانية تعمل بشكل أفضل عندما تكون متوازنة تماما، أي عندما تواجه محصلة عزم دوراني صفرية. في الغالب تمر نقطة ارتكاز الميزان بمركز كتلته فيتزن الميزان عندما يكون خالياً. يرتب الراكبون أنفسهم بحيث تُلغي عزوم الدوران التي يبذلونها على الميزان بعضها بعضا تماما. عندها ستكون محصلة عزم الدوران على الميزان والتسارع الزاوي صفرا، وبالتالي يدور الميزان بسرعة زاوية ثابتة. سيبقى إما ساكناً أو سيدور بثبات في اتجاه ما أو آخر.

لجعل الميزان يميل للأعلى وللأسفل، يعدّل الركاب عزوم الدوران التي يبذلونها عليه برفق. يتمكنون من فعل ذلك إما عن طريق إمالة أنفسهم، وهكذا يغيرون المسافة بينهم وبين نقطة الارتكاز، أو عن طريق الدفع على الأرض بأقدامهم، وهكذا يغيرون القوى التي يؤثرون بها على الميزان. في أي من الحالتين، فإنهم يخلّون بتوازن الميزان، وبالتالي سيخضع الميزان لكل من محصلة عزم دوراني وتسارع زاوي. بتغيير محصلة العزم الدوراني على الميزان بطريقة متناغمة، فإن الركاب يجعلونه يتأرجح للأعلى وللأسفل.

كيفية عمل العجلات

تسهل العجلات الحركة عن طريق إلغاء أو تقليل احتكاك الانزلاق بين الجسم والسطح. تنقل العجلات القوى الداعمة الضرورية لحمل جسم ما مع السماح للجسم بالحركة بدون انزلاق. عندما تتحرك عربة بعجلات حرة الدوران على السطح، فإن الاحتكاك الساكن بين كل عجلة والسطح يبذل عزماً دورانياً على تلك العجلة ويجعلها تدور. ولكن قد يحدث احتكاك بين مركز العجلة والمحور، حيث يمكن لاحتكاك الانزلاق أن يهدر طاقة ويسبب تلفاً. لإزالة احتكاك الانزلاق، كثيراً ما يستخدم محامل ذات أسطوانات أو كرات.

إن عزم الدوران الذي يسبب دوران العجلة الدافعة في السيارة يأتي من المحرك عن طريق المحور. في هذه الحالة، يبذل الاحتكاك الساكن بين السطح الخارجي للعجلة والأرض عزماً دورانياً على العجلة يعاكس العزم الدوراني الناتج من المحرك. تساهم قوة الاحتكاك الساكن هذه أيضا في محصلة القوة على السيارة وتسبب في تسارعها.

ما أن تُدعم الأجسام بالعجلات والمحامل إلا وتستطيع أن تتحرك بحرية وتحتفظ بكمية حركتها الخطية والزاوية وطاقتها لفترات طويلة من الزمن. بإلغاء احتكاك الانزلاق، فإن العجلات يمكنها أيضا منع الأجسام من تحويل الطاقة المنتظمة إلى طاقة حرارية. تسمح العجلات للسيارات بالاحتفاظ بهذه الكميات المحفوظة لفترات طويلة من الزمن وتجعل التنقل عمليا أكثر.

كيفية عمل سيارات التصادم

بما أن سيارات التصادم تبدأ حركتها من السكون، فيجب عليها أن تتحصل على كميات حركتها وكميات حركتها الزاوية الابتدائية من الأرض وطاقتها الحركية الابتدائية من شركة الكهرباء. يساعدها في ذلك المحركات والعجلات، والتي تنقل الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية تدريجيا إلى السيارات.

بمجرد أن تبدأ السيارات بالحركة، فيمكنها تبادل تلك الكميات المحفوظة عن طريق التصادمات. في الغالب، كل تصادم يغيّر من سرعات السيارات واتجاهات حركتها بطريقة قد تبدو معقدة نوعاً ما. ولكن، بتتبع تبادلات كمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية، والطاقة، يكون من السهل في أغلب الأحيان فهم هذه التصادمات.

إن السيارات التي تحوي ركّاباً ضخاماً تستجيب بشكل ضعيف عندما تنقل التصادمات كمية الحركة وكمية الحركة الزاوية إليهم، ذلك لأن كتلها وكتلها الدورانية الكبيرة تقلل من تغيّرات سرعتها وسرعتها الزاوية. لأن الأطفال لهم كتل صغيرة، فهم الذين يستمتعون بجولات لعب مثيرة أكثر.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون نيوتن الأول للحركة الدورانية:

الجسم الصلب غير المترنح وغير الخاضع لأي عزم دوراني خارجي يدور بسرعة زاوية ثابتة، فيلف بكميات متساوية في فترات زمنية متساوية حول محور دوران مثبت.

٢. قانون نيوتن الثاني للحركة الدورانية:

العزم الدوراني المبذول على جسم يساوي حاصل ضرب كتلة ذلك الجسم الدورانية في تسارعه الزاوي، أو

عزم الدوران = الكتلة الدورانية × التسارع الزاوي (٢,١,٢).

يشير التسارع الزاوي لنفس اتجاه العزم الدوراني. هذا القانون لا ينطبق على الأجسام المترنحة.

٣. العلاقة بين القوة وعزم الدوران:

عزم الدوران الناتج من قوة يساوي حاصل ضرب ذراع الرافعة في مركبة تلك القوة العمودية على ذراع الرافعة، أو

عزم الدوران = ذراع الرافعة × القوة العمودية على ذراع الرافعة (٣,١,٢).

٤. الطاقة الحركية:

الطاقة الحركية الانتقالية لجسم ما هي نصف كتلته مضروبا في مربع سرعته، أو

الطاقة الحركية = $\frac{١}{٢}$ الكتلة × السرعة^{٢}. (١,٢,٢)

والطاقة الحركية الدورانية لجسم ما هي نصف كتلته الدورانية الكلية مضروبا في مربع سرعته الزاوية، أو

الطاقة الحركية الدورانية = $\frac{١}{٢}$ الكتلة الدورانية × السرعة الزاوية^{٢} (٢,٢,٢).

٥. كمية الحركة الخطية:

كمية الحركة الخطية لجسم ما هي كتلته مضروبا في سرعته، أو

كمية الحركة الخطية = الكتلة × السرعة (١,٣,٢)

٦. تعريف دفع القوة:

دفع القوة المعطى لجسم يساوي حاصل ضرب القوة المبذولة على ذلك الجسم في الفترة الزمنية التي أثرت فيها هذه القوة، أو

دفع القوة = القوة × الزمن (٢,٣,٢)

٧. كمية الحركة الزاوية:

كمية الحركة الزاوية لجسم ما هي حاصل ضرب كتلته الدورانية في سرعته الزاوية، أو

كمية الحركة الزاوية = الكتلة الدورانية × السرعة الزاوية (٤,٣,٢).

٨. تعريف دفع القوة الزاوي:

دفع القوة الزاوي المعطى لجسم يساوي حاصل ضرب عزم الدوران المبذول على ذلك الجسم في الفترة الزمنية التي أثر فيها ذلك العزم الدوراني، أو

دفع القوة الزاوي = عزم الدوران × الزمن (٥،٣،٢)

٩. قانون نيوتن الثالث للحركة الدورانية:

لكل عزم دوراني يبذله جسم على جسم آخر، يوجد عزم دوراني آخر مساوٍ في المقدار ومعاكس في الاتجاه يبذله الجسم الآخر على الجسم الأول.

١٠. الطاقة الكامنة والتسارع:

يتسارع الجسم في الاتجاه الذي يؤدي لتقليل طاقته الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن.

تحقق من فهمك - الإجابات

٢-١ لعبة الميزان

١. تقوم الصينية القابلة للدوران (سوزان الكسولة) بحركة دورانية بينما تقوم عربة الحلويات المتنقلة بحركة انتقالية.

لماذا: الصينية القابلة للدوران (سوزان الكسولة) لها نقطة ارتكاز مثبتة في مركزها. نقطة الارتكاز لا تتحرك، بغض النظر عن كيفية إدارتك للصينية. على النقيض من ذلك، فإن عربة الحلويات تتحرك في الغرفة وليس لها أي نقطة ارتكاز. يمكن للخادم أن يدير عربة الحلويات عند الحاجة، ولكن حركتها الأساسية هي الحركة الانتقالية.

٢. ستستمر بالدوران بمعدل ثابت حول محور دوران ثابت (بالرغم من أن الاحتكاك مع الماء سيجعل دوران الكرة يتباطأ تدريجيا).

لماذا: بما أن كرة السلة حرة من أي عزم دوران، والذي هو التأثير الخارجي الذي يؤثر في الحركة الدورانية، فسيكون لها سرعة زاوية ثابتة. إذا قمت بلف كرة السلة، فإنها ستستمر بالدوران حول أي محور تختاره. إذا لم تلف كرة السلة، فإن سرعتها الزاوية ستكون صفرا وستظل ساكنة.

٣. نعم، يسقط مركز كتلته بسلاسة، متبعاً القوانين التي تحكم الأجسام الساقطة. عندما يسقط، فإن جسمه يدور بسرعة زاويّة ثابتة حول مركز كتلته.

لماذا: مثل كرة القدم المقذوفة أو عصا الاستعراض المرماة، فإن الغطّاس يُعد جسماً صلباً في حالة دوران. يمكن فصل حركته إلى حركة انتقالية لمركز كتلته (إذا سقط) وحركة دورانية حول مركز كتلته (إذا دار حوله بسرعة زاوية ثابتة). مع أن الغطاس قد لا يفكر بحركته بهذا التعبير، لكنه مدرك بحدسه الحاجة لمعاملة كلا حركتيه الانتقالية والدورانية بعناية. إن الارتطام بالماء بصدره لأنه لم يحسن التحكم بحركته الدورانية ليس أكثر متعة من الارتطام بلوحة الغطس لأنه لم يحسن التحكم بحركته الانتقالية.

٤. دوامة الخيل (merry-go-round) الممتلئة لها كتلة دورانية ضخمة.

لماذا: إن بدء حركة الدوامة أو توقيفها يتضمن تسارعاً زاوياً. كونك الدافع للدوامة (merry-go-round)، فأنت تبذل عزم دوران عليها يجعلها تخضع لتسارع زاوي. ولكن هذا التسارع الزاوي يعتمد على كتلة الدوامة الدورانية، والتي بدورها تعتمد على مقدار الكتلة التي عليها وبُعد تلك الكتلة عن محور الدوران. بوجود العديد من الأطفال على الدوامة والذين يزيدون من كتلتها الدورانية، فإن تسارعها الزاوي يميل لأن يكون صغيرا.

٥. كلما اقترب الورق المقوى من نقطة ثبات المقص، زادت القوة التي يجب أن يبذلها الورق المقوى على المقص لإنتاج عزم دوران يكفي لمنع المقص من الانغلاق بالدوران. عندما لا يستطيع الورق المقوى إنتاج عزم دوران كافٍ، فإنه في هذه الحالة يستطيع المقص قطع الورق.

لماذا: عندما تضع ورقاً مقوى قريباً من نقطة ثبات مقص فأنت تطالب ذلك الورق أن يبذل قوى عظيمة على المقص لمنعه من الانغلاق بالدوران. يبدأ ويتوقف الدوران عن طريق عزم القوة، والقوة المبذولة بالقرب من نقطة الثبات تنتج عزماً دورانياً صغيراً نسبياً.

٦. حوالي 1000N (220lbf).

لماذا: بما أن المسمار أقرب لنقطة الارتكاز بمقدار عشرة أضعاف، فإنه يجب على المسمار أن يبذل عشرة أضعاف القوة على المطرقة لإنتاج عزم دوران له نفس المقدار الذي تبذله في سحب مقبض المطرقة. عندما يقوم المسمار بسحب المطرقة، فإن المطرقة تقوم بسحب المسمار. على الرغم من أن الخشب يبذل قوة احتكاك على المسمار لمنعه من الحركة، ولكن قوة نزع المسمار تتغلب على هذا الاحتكاك وينزلق المسمار ببطء خارج الخشب.

٧. إن تغيراً كبيراً في موقع الحمولة أثناء العاصفة يمكن أن يحدث عدم توازن في السفينة، والذي يسبب في تكوّن محصلة عزم دوران على السفينة، ويؤدي لجعلها تبدأ بالدوران حول نقطة الارتكاز الفعّالة. عندها يمكن للسفينة أن تنقلب.

لماذا: بالرغم من أن معظم السفن تستطيع أن تعادل بعضا من عدم التوازن في الحمولة، إلا أن تغيير موقع الحمولة يمكنه بسهولة قلب سفينة مستقرة تماما. يحدث هذا كثيرا في الحياة الحقيقية، وفي الغالب يصحبه تداعيات خطرة. بعض المراكب البحرية، وخاصة الكانو (زورق طويل وخفيف يتحرك بالتجديف) وزورق السباق (زورق خفيف وضيق يتحرك بالتجديف)، حساسة جدا لأي خلل في توازن الحمولة ويمكنها أن تنقلب بسهولة من قبل ركّاب مهملين أو متحركين.

٢-٢ العجلات

١. يدفع الاحتكاك الكأس للأعلى.

لماذا: تنزلق الكأس للأسفل من سطح الطاولة الساكنة. بما أن الاحتكاك يعاكس الحركة النسبية دائما، فإنه يدفع الكأس للأعلى، في اتجاه معاكس لاتجاه حركتها.

٢. حوالي ضعف الصعوبة.

لماذا: قوى الاحتكاك بين الطاولة والكتابين تتناسب تقريبا مع القوى التي تضغط

سطحيهما على بعض. وزن الكتابين هو القوة التي تضغط هذين السطحين على بعض. فعندما تضاعف وزن الكتاب فعليا بوضع كتاب آخر فوقه، فأنت تضاعف قوة الاحتكاك بين الطاولة والكتابين.

٣. إذا استمرت العجلات بالدوران، فإنها ستعاني من احتكاك ساكن مع الشارع المرصوف. إذا انغلقت العجلات (لم يسمح لها بالدوران) وبدأت بالتزحلق، فإنها ستواجه احتكاك انزلاق. بما أن الالتصاق الناتج من الاحتكاك الساكن أكبر من الناتج عن احتكاك الانزلاق، فإن السيارة ستتباطأ بمعدل أسرع عندما لا تتزحلق العجلات.
لماذا: لتتوقف السيارة بشكل سريع، فإنها تحتاج أقصى قوة ممكنة في اتجاه معاكس لاتجاه سرعتها. الطريقة الأكثر فعالية للحصول على قوة التوقيف هذه من الطريق هي بالاحتكاك الساكن بين العجلات الدائرة والشارع المرصوف. إن احتكاك الانزلاق، الناتج من تزحلق العجلات، أقل فعالية في توقيف السيارة، ويؤدي لتلف العجلات، ويقلل من قدرة السائق على التحكم بالسيارة.

٤. تبذل الرامية شغلاً على القوس والوتر أثناء شد الوتر للخلف (تُنقل الطاقة الكيميائية من جسمها إلى القوس، حيث تخزّن كطاقة كامنة مرنة). عندما تطلق السهم، يقوم القوس والوتر ببذل شغل على السهم (تُنقل الطاقة الكامنة المرنة إلى السهم، حيث تصبح طاقة حركية). أخيرا، يقوم السهم ببذل شغل على التفاحة، حيث يوقعها من فوق رأس المساعد (تُنقل الطاقة الحركية من السهم إلى التفاحة).
لماذا: بما أن الطاقة محفوظة، يمكننا نظرياً تتبعها رجوعا لنشأة الكون. فأي طاقة نراها حولنا الآن كانت في مكان ما في كوننا بالأمس، والأسبوع المنصرم، وقبل مليون عام، على الرغم من أن شكلها قد يكون مختلفاً. ستظل الطاقة موجودة في كوننا العام القادم أيضا، ولكن قد لا تكون على شكل طاقة مفيدة.

٥. تشتمل القيادة العادية للسيارة في الغالب على الاحتكاك الساكن لأن أسطح العجلات لا تتزحلق على أرضية الشارع. يشمل التزحلق احتكاك الانزلاق حيث تتحرك أسطح العجلات بشكل مستقل عن أرضية الشارع. بما أن التزحلق يشمل احتكاك انزلاق، فإنه يوّلد طاقة حرارية ويتلف العجلات.
لماذا: المصطلح «حرق المطاط» هو اسم مناسب لتزحلق السيارة أثناء «القفزة الأرنبية» عند بدء حركتها بشكل سريع من السكون. فهذه العملية تنتج كمية عظيمة من الطاقة الحرارية، وتترك أثار المطاط الساخن على أرضية الشارع خلف السيارة. في سباقات السيارات، يمكن لحرارة الاحتكاك الناتجة من التزحلق عند بدء السباق أن تكون كبيرة جدا بحيث تسبب فعليا في احتراق العجلات.

٦. بما أن جميع القوى الداعمة قريبة من محور الدوران، فإن الجواهر تبذل عزم دوران مقداره تقريبا صفر على المحور. فيدور المحور بحرية مدهشة.
لماذا: تحتاج الساعات الميكانيكية حركة مثالية للمحافظة على الدقة في الوقت. إن أحد أفضل الطرق للسماح للأجسام الدورانية للتحرك بحرية هو دعم الجسم عند محور دورانه بالضبط، حيث لا يستطيع هذا الدعم بذل عزم دوران على الجسم.

٧. مضاعفة سرعة كرة البيسبول تتطلب زيادة الطاقة التي يبذلها الرامي على الكرة إلى أربعة أضعاف.
لماذا: لقذف كرة بسرعة 160km/h (100mph)، فإن الرامي المحترف يجب عليه أن يضع أربعة أضعاف الطاقة الحركية في كل من الكرة وذراعه مقارنة بالطاقة الحركية التي يضعها عند قذفه الكرة بسرعة بطيئة هي 80km/h. كما أنه يقذف الكرة السريعة في نصف الزمن اللازم لقذف الكرة البطيئة. إجمالا، يجب عليه أن يبذل أربعة أضعاف الشغل لقذف الكرة السريعة ويجب أن يقوم بهذا الشغل في نصف الزمن. هذا يعني أن الرامي ينتج ثمانية أضعاف القدرة عندما يقذف كرة سريعة مقارنة بقذف الكرة البطيئة. لا عجب أن المبتدئين يواجهون صعوبة في تقليد هذا الإنجاز.

٢-٣ سيارات التصادم

١. بنقل كمية حركة متجهة نحو الجنوب للحذاء، فأنت ستكتسب كمية حركة في اتجاه الشمال.
لماذا: ابتداء، أنت وحذاؤك لكما كمية حركة صفرية، ولكن عندما تقذف حذاءك باتجاه الجنوب، فتعطيه كمية حركة باتجاه الجنوب. بما أن المصدر الوحيد لكمية الحركة باتجاه الجنوب هو أنت، فيجب أن تكون قد فقدت كمية حركة متجهة للجنوب. إن المقدار السالب من كمية الحركة باتجاه الجنوب هو في الحقيقة كمية حركة باتجاه الشمال، لذا أنت تتحرك باتجاه الشمال. المثير للانتباه هو أن كمية الحركة الكلية الخاصة بك وبحذائك لم تتغير. ما زالت صفرا، ويجب أن تكون كذلك لأن كمية الحركة محفوظة. ببساطة فقط أعيد توزيعها.

٢. ستكون الكرة المطاطية المرتدة أكثر فعالية.
لماذا: أي من المقذوفين سينقل جميع كمية حركته الأصلية لأوتاد البولنج بينما يتوقف، ولكن بعد ذلك سترتد الكرة المطاطية وتستمر في بذل قوة على أوتاد البولنج. دفع القوة (القوة . الزمن) الذي تبذله الكرة المطاطية سيكون أكبر من الذي يبذله كيس الفول لأن الكرة ستبذل قوتها باتجاه الأمام لفترة زمنية أطول (أثناء التوقف والارتداد). سترتد الكرة بكمية حركتها في الاتجاه المعاكس، بعد أن نقلت تقريبا ضعف كمية حركتها الأصلية للوتد.

٣. الأقمار الصناعية غير قادرة على التخلص من كمية حركتها الزاوية.
لماذا: بسبب عزلتها الشديدة، فإن الأقمار الصناعية المتحركة في مدارها ليس لديها أي شيء يمكن أن تتبادل معه كمية حركتها الزاوية. كمية الحركة الزاوية المعطاة لها عند الانطلاق تظل معها لأجل غير محدد، فتستمر في الدوران حول نفسها لعقود من الزمن.

٤. أتت من الأرض بأكملها.
لماذا: بما أن الشخص وقف على الأرض عندما بدأ بتدوير الدوامة، فقد نقل كمية الحركة الزاوية من الأرض إلى الدوامة. تدور الدوامة في اتجاه واحد، ويتغير دوران الأرض بشكل طفيف جدا في الاتجاه المعاكس. بما أن الكرة الأرضية ضخمة جدا ولها كتلة دورانية عظيمة، فإن هذا التغير في دوران الأرض غير ملاحظ.

٥. قامت سيارتك بنقل كمية حركة للحائط ولكنها لم تنقل له طاقة.
لماذا: لنقل كمية حركة للحائط، يجب على سيارتك أن تعطيه قوة دفع: يجب أن

تدفع الحائط لفترة زمنية، بالفعل قامت سيارتك بذلك وبالتالي نقلت جميع كمية حركتها في الاتجاه الخلفي للحائط. ولكن لنقل الطاقة للحائط، لا بد أن تقوم سيارتك بشغل عليه: يجب أن تدفع الحائط ويتحرك الحائط باتجاه ذلك الدفع. ولكن الحائط لا يتحرك، لذا لم تستطع سيارتك أن تقوم بأي شغل عليه. بدلا من ذلك، ظلت طاقة السيارة في السيارة، حيث أحدثت ضررا.

٦. سيتسارع الطفل للأمام، في الاتجاه الذي ستنخفض فيه الطاقة الكامنة للطفل بأسرع ما يمكن.

لماذا: لدى الطفل نوع واحد فقط من الطاقة – طاقة الجذب الكامنة. طاقة الجذب الكامنة هذه تكون أقل ما يمكن عندما يكون الطفل أسفل دعامة الأرجوحة مباشرة. يتسارع الطفل للأمام لأن ذلك سيجعله أسفل الدعامة بأسرع ما يمكن.

دقق في أرقامك – الإجابات

٢-١ لعبة الميزان

١. حوالي عشرة أضعاف مقدار عزم الدوران

لماذا: للمحافظة على التسارع الزاوي في المعادلة (١,١,٢) دون أي تغير مع زيادة الكتلة الدورانية لعشرة أضعاف، فإن عزم الدوران يجب أن يزيد أيضا عشرة أضعاف. من الصعب جداً تدوير الإطارات المصمتة أو إيقافها من دورانها، ولهذا فإن السيارات تستخدم الإطارات المجوفة.

٢. خمسة أضعاف عزم الدوران السابق.

لماذا: يزيد الأنبوب من طول ذراع رافعة المفتاح إلى خمسة أضعاف، من 0.2 متر إلى 1.0 متر، طبقا للمعادلة (٢,١,٣)، عند بذل القوة ذاتها على بعد خمسة أضعاف المسافة من نقطة الارتكاز فإنها تنتج خمسة أضعاف عزم الدوران حول تلك النقطة. إن تمديد مقبض أداة شبيهة بالرافعة هو تقنية شائعة لزيادة عزم الدوران المتاح، لكن قد يكون خطراً على كلٍ من الأداة والمستخدم. يأتي مع بعض الأدوات المصممة لمثل هذه الاستخدامات العنيفة امتدادات للمقبض قابلة للفصل.

٢-٢ العجلات

١. مائة ضعف مقدار الطاقة الحركية.

لماذا: بما أن الطاقة الحركية تتناسب مع مربع السرعة، فإن الكيلوجرام من الهواء في الإعصار يتحرك عشرة أضعاف سرعة الهواء الأبطأ حركة ولكن لديه مائة ضعف من الطاقة الحركية. هذه الزيادة العظيمة في الطاقة هي التي تجعل رياح الإعصار خطرة جدا. كما أن سرعة الهواء الهائلة تدفع كميات كبيرة من الهواء لك بمعدل أعلى، لذا فإن قدرة الهواء التي تصل في كل ثانية تكون ساحقة.

٢. سيضاعف الأطفال الطاقة الحركية للدوامة ثلاثة أضعاف.

لماذا: تتناسب الطاقة الحركية لجسم دوراني مع كتلته الدورانية. بما أن الأطفال يضاعفون الكتلة الدورانية للدوامة ثلاثة أضعاف، فإنهم يضاعفون طاقتها الحركية ثلاثة أضعاف أيضا.

٢-٣ سيارات التصادم

١. 440,000kg·m/s ، في الاتجاه الأمامي.

لماذا: يمكنك استخدام المعادلة (١,٣,٢) لحساب كمية حركة القطار من كتلته وسرعته:

كمية الحركة الخطية = 440,000kg·m/s = 20,000kg · 22m/s

كمية الحركة هذه تكون في نفس اتجاه حركة القطار، أي في الاتجاه الأمامي.

٢. 2200 ثانية، فودّع كعوب حذائك!

لماذا: لإيقاف القطار يجب أن تبذل عليه دفع قوة للخلف يلغي كمية حركته الأمامية تماما. بما أن كمية حركته للأمام مقدارها 440,000kg·m/s ، فإن دفع القوة للخلف يجب أن يكون مقداره 440,000kg·m/s. وبما أن 200N يمكن كتابتها كـ 200kg·m^2 ، فيمكننا استخدام المعادلة ٢,٣,٢ لإيجاد الزمن اللازم لإيقاف القطار:

$$\text{الزمن} = \frac{440{,}000\text{kg}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}}{200\text{kg}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

٣. ستتضاعف كمية الحركة الزاوية خمسة أضعاف.

لماذا: بما أن كمية الحركة الزاوية للقمر الصناعي تتناسب مع سرعته الزاوية، فدورانه بخمسة أضعاف السرعة سيزيد من كمية حركته الزاوية بنفس النسبة.

٤. سوف يستغرقون خمسة أضعاف الوقت.

لماذا: للوصول للسرعة الزاوية الجديدة والأكبر، سيحتاج رواد الفضاء لدفع قوة زاوي يكون خمسة أضعاف المقدار المخطط له مسبقا. بما أنهم سيستخدمون نفس عزم الدوران السابق، فإنه سيلزمهم بذل هذا العزم الدوراني لخمسة أضعاف الفترة الزمنية.

تمارين

١. المقاعد في قاعة مرتبة بحيث أنها لا تتجه كلها لنفس الاتجاه. كيف يمكنك وصف موقعهم الزاوي بدلالة موضع مرجعي ودوران؟

٢. عندما تبدأ الطائرة بتشغيل مراوحها، فإنها تدور ببطء في بداية الأمر ثم تزداد سرعة تدريجيا. لماذا تستغرق وقتا طويلا لتصل لسرعتها الدورانية القصوى؟

٣. يوازن ميكانيكي السيارات عجلات سيارتك للتأكد من أن مراكز كتلها تقع بالضبط عند مراكزها الهندسية. بإهمال الاحتكاك ومقاومة الهواء، كيف سيكون سلوك عجلة غير متوازنة إذا كانت تدور بذاتها؟

٤. مركز كتلة جسم ليس بالضرورة داخل الجسم، والذي يمكن أن تراه بلف الجسم. أين يقع مركز كتلة البومرانغ (قطعة الخشب الملوية) (boomerang) أو حدوة الحصان؟

٥. لماذا من الصعب البدء بتدوير طاولة الروليت، وما الذي يجعلها تستمر في الدوران عندما تبدأ؟

٦. لماذا لا تستطيع فتح باب بدفع مقبضه باتجاه أو عكس اتجاه مفصلاته مباشرة؟

٧. لماذا لا تستطيع فتح باب بدفعه عند مفصلاته؟

٨. إن حمل ثقل بيدك عندما تكون ذراعك قريبة من جانبك أسهل من حمله عندما تكون ذراعك ممتدة أمامك. استخدم مفهوم عزم الدوران لتفسير هذه الظاهرة.

٩. تُشغّل الطاحونة باستخدام الماء الساقط، والذي يصب في دُلِيّ موجودة في الحافة الخارجية لعجلة ضخمة، و يقوم وزن الماء بإدارة العجلة. لماذا من المهم أن تكون هذه الدلي في الحافة الخارجية للعجلة؟

١٠. كيف يمكن لحبل لعبة اليويو (yo-yo) أن يمكنّها من الدوران؟

١١. إحدى الطرق لكسر جوزة هي وضعها في طرف الباب الذي فيه المفصلات ثم البدء بغلق الباب. لماذا تنتج القوة الصغيرة على الباب قوة كبيرة على قشرة الجوزة؟

١٢. الزرادية (الكماشة) المعتادة لها موضع لقطع الأسلاك أو الصواميل أو المسامير. لماذا من المهم أن يكون موضع هذا القاطع قريباً جداً من نقطة ثبات الزردية؟

١٣. يمكنك القيام برياضة الدفع للأعلى بجعل أصابع أقدامك أو ركبتيك نقطة ثبات يدور جسمك حولها. عندما تتمحور حول ركبتيك، فإن قدميك في الحقيقة تعينك في رفع رأسك وصدرك. فسر ذلك.

١٤. كثيراً ما يستخدم السائرون على الحبال المعلقة قضيباً طويلاً للموازنة. على الرغم من أن القضبان ليس لها وزن كبير إلا أنها يمكن أن تبذل عزوماً دورانية كبيرة على السائرين لمنعهم من الميل والسقوط من على الحبل. لماذا تكون القضبان طويلة؟

١٥. تصمم بعض سيارات السباق بحيث تكون محركاتها الضخمة قريبة من مراكز السيارات الهندسية. لماذا يجعل هذا التصميم من السهل على السيارة الانعطاف بسرعة؟

١٦. كيف تستخدم فتّاحة القوارير مبدأ الفائدة الميكانيكية لنزع غطاء قارورة مشروب الصودا؟

١٧. تمسك أداة فتح غطاء البرطمان بالغطاء وتوفر لك مقبضاً طويلاً لكي تقوم بلفه. لماذا يساعدك طول هذا المقبض في فتح البرطمان؟

١٨. عندما تتسلق على امتداد غصن شجرة رفيع، فإن هناك احتمال أن ينقطع الغصن بالقرب من جذع الشجرة. لماذا تحدث هذه الكارثة غالباً عندما تكون أبعد ما يمكن على الغصن؟

١٩. كيف يمكن لعتلة أن تسهل رفع حافة صندوق ثقيل بضع سنتيمترات فوق مستوى الأرض؟

٢٠. تقع سلة عجلة اليد ذات العجلة الواحدة بين العجلة والمقابض. كيف يمكن لهذا الترتيب أن يجعل من السهل عليك رفع حمل ثقيل موضوع في السلة؟

٢١. كثيراً ما يتوقف المتزلجون عن طريق لف زلاجاتهم جانبيا والتزحلق على الثلج. كيف يمكن لهذه الطريقة أن تزيل الطاقة من المتزلج، وماذا يحدث لتلك الطاقة؟

٢٢. يبذل حصان شغلا على عربة يجرها على طول طريق مستقيم ومستوٍ بسرعة ثابتة. ينقل الحصان طاقة للعربة، فلماذا لا تسير العربة أسرع وأسرع؟ أين تذهب الطاقة؟

٢٣. فسّر لماذا يستطيع مرقاق العجين أن يفرد العجين دون مواجهة احتكاك انزلاق يذكر أثناء حركته؟

٢٤. يرتدي العداءون المحترفون أحذية لها مسامير لمنعهم من الانزلاق على مضمار السباق عند بدء السباق. لماذا تهدر الطاقة كلما تتزحلق قدم العداء للخلف على طول مسار السباق؟

٢٥. اليويو هي لعبة على شكل بكرة تدور حول خيط. في اليويو المتطورة، تكون نهاية الخيط على شكل حلقة حول القضيب المركزي لليويو بحيث تستطيع اليويو الدوران بحرية عند نهاية الخيط. لماذا تدور اليويو لفترة أطول عندما يكون القضيب المركزي رفيعاً جدا وأملس؟

٢٦. عندما تبدأ بتحريك دراجتك وتتسارع للأمام، ما هو الشيء الذي يبذل القوة للأمام التي تحتاجها الدراجة لتتسارع؟

٢٧. عندما تبدأ بالمشي للأمام، ما هو الشيء الذي يبذل القوة التي تسمح لك بالتسارع؟

٢٨. إذا كنت تسحب زلاجة بسرعة ثابتة عبر حقل مستوٍ، ما هي المقارنة بين القوة التي تبذلها على الزلاجة مع قوة احتكاك الانزلاق المؤثرة على أرجل الزلاجة؟

٢٩. لماذا يساعد وضع رمل في صندوق السيارة على منع عجلات السيارة الخلفية من التزحلق على الطريق المغطى بالجليد؟

٣٠. عندما تقود سيارتك على طريق مستوٍ يغطيه جليد، فأنت بالكاد تلاحظ ذلك الجليد عندما تسير بسرعة ثابتة في خط مستقيم. لماذا تشعر أن الطريق زلق فقط عندما تحاول أن تدير السيارة لليمين أو اليسار، أو عندما تريد زيادة السرعة أو تقليلها؟

٣١. صف عملية الكتابة بالطباشير على اللوح من حيث الاحتكاك والتلف؟

٣٢. السقوط على كومة من أوراق الشجر مريح أكثر من السقوط على الأرض الجرداء. في كلتا الحالتين أنت تقف نهائياً، فلماذا يكون سقوطك على كومة الأوراق أكثر راحة؟

٣٣. في عدد لا نهائي من المشاهد التلفزيونية والأفلام، يقوم البطل بلكم الرجل الشرير المفتول العضلات والذي لا يتحرك البتة بهذا التصادم. لماذا هذا الشرير غير المتحرك هو من خيال هوليود؟

٣٤. لماذا لا يستطيع البهلوان إيقاف دورانه وهو محلق في الهواء؟

٣٥. عندما تكون لاعبة الجمباز محلقة في الهواء أثناء القفز، أي من هذه الكميات يجب أن تظل ثابتة لها: السرعة، أو كمية الحركة، أو السرعة الزاوية، أو كمية الحركة الزاوية؟

٣٦. إذا جلست في كرسي دوّار جيد وقدماك مرفوعة عن الأرضية، فإن الكرسي سيدور قليلا عندما تتحرك ولكنه سيقف فورا عندما تتوقف أنت. لماذا لا تستطيع أن تجعل الكرسي يدور دون الإمساك بشيء ما؟

٣٧. عندما ينفد الوقود النووي لنجم، فإنه يمكن للجاذبية أن تسحقه ليصبح نجماً نيترونياً له قطر يساوي حوالي 20 كيلومتر (12 ميل). بينما يحتاج النجم حوالي عاماً للقيام بدورة واحدة قبل انكماشه، فإن النجم النيتروني يدور عدة مرات في الثانية الواحدة. فسر هذه الزيادة المدهشة في السرعة الزاوية.

٣٨. يلف المدوان (لعبة البلبل) فترة طويلة من الزمن على حافته الحادة. لماذا يطول الوقت حتى يبطئ الاحتكاك دوران المدوان؟

٣٩. إن إصابة ساقيك وركبتيك أثناء الهبوط من جبل سيرا على الأقدام أسهل منها أثناء الصعود. استخدم مفهوم الطاقة لتفسير هذه الملاحظة.

٤٠. عند لحظة تركك لكرة البولنج فإنها لا تدور، ولكن عندما تتزحلق على الممر فإنها تبدأ بالدوران. استخدم مفهوم الطاقة لتفسّر لماذا تتناقص سرعة الكرة للأمام عندما تبدأ بالدوران.

٤١. يتزحلق رجال الإطفاء لأسفل قضيب لكي يصلوا لحافلاتهم بشكل أسرع. ماذا يحدث لطاقة جذبهم الكامنة، وكيف تعتمد على زلاقة القضيب؟

مسائل

١. عندما تركب دراجة، فإن قدمك تدفع الدواسة للأسفل والتي على بعد 17.5 سنتيمترا (0.175m) من محور الدوران. تنتج القوة التي تبذلها عزم دوران على الساعد المتصل بالدواسة. افترض أنك تزن 700N . إذا وضعت جميع ثقلك على الدواسة وهي أمام ساعد محور الدوران مباشرة، فما هو عزم الدوران الذي تبذله على الساعد؟

٢. تستطيع دوامة خيل أثرية تُشغّل بمحرك كهربائي أن تخضع لتسارع زاوي ثابت من السكون للسرعة الدورانية القصوى خلال 5 ثوانٍ. عندما تنتهي جولة اللعب، يتسبب مكبح بتبطئتها بمعدل ثابت من سرعتها الزاوية القصوى إلى السكون خلال 10 ثوان. قارن بين عزم الدوران الذي يجعل الدوامة تبدأ بالدوران والعزم الذي يؤدي لوقفها.

٣. عندما تقوم بتشغيل جهاز الحاسب الآلي، فإن القرص الصلب يبدأ بالدوران. يأخذ القرص 6 ثوان من التسارع الزاوي الثابت ليصل لسرعته القصوى، وعندها يمكن لجهاز الحاسب الآلي أن يبدأ بالتواصل معه. إذا أردت أن يصل القرص الصلب لسرعته القصوى خلال ثانيتين فقط، فما هو مقدار الزيادة في عزم الدوران التي يجب أن يبذلها محرك القرص الصلب عليه أثناء بدء العملية؟

٤. يستخدم المنشار الكهربائي شفرة دائرية الشكل ودورانية الحركة لقطع الخشب. عندما تبدأ بتشغيل المنشار، فإن المحرك يحتاج ثانيتين من التسارع الزاوي الثابت لتصل الشفرة لسرعتها الزاوية القصوى. إذا غيرتَ الشفرة بحيث يكون للجزء الدوراني للمنشار ثلاثة أضعاف كتلته الدورانية الأصلية، فكم من الوقت سيحتاج المحرك ليصل بالشفرة لسرعتها الزاوية القصوى؟

٥. عندما يقطع المنشار المذكور في المسألة ٤ الخشب، فإن الخشب يبذل قوة مقدارها 100N على الشفرة على بعد 0.125m من محور دوران الشفرة. إذا كانت تلك القوة عمودية على ذراع الرافعة، فما هو مقدار عزم الدوران الذي يبذله

الخشب على الشفرة؟ هل هذا العزم الدوراني يجعل الشفرة تدور أسرع أم أبطأ؟

٦. عندما تدفع على مقبض كسارة جوز خشبية للأسفل، فإن تمحور فكيّها يكون للأعلى ويؤدي لكسر الجوز. إذا كان بعد النقطة التي تدفع عندها المقبض للأسفل عن نقطة الارتكاز هو خمسة أضعاف بعد الفك الذي يدفع الجوز عن نقطة الارتكاز، فما مقدار القوة الذي سيبذلها الفك على الجوز إذا بذلت قوة مقدارها 20N على المقبض؟ (افترض أن جميع القوى عمودية على ذراع الرافعة المعنية).

٧. بعض العربات الخاصة لها أقراص دورانية (حذّافات) لتخزين الطاقة أثناء دورانها هبوطا من منحدر. تستخدم هذه العربات تلك الطاقة المخزونة لرفع نفسها لأعلى منحدر فيما بعد. حذّافاتها لها كتل دورانية صغيرة نسبيا ولكنها تدور بسرعات زاوية هائلة. كيف ستتغير الطاقة الحركية للحذّافة إذا كانت كتلتها الدورانية أكبر بمقدار خمسة أضعاف بينما سرعتها الزاوية خمسة أضعاف أصغر؟

٨. ما هي كمية حركة ذبابة تسير بسرعة 1m/s ولها كتلة مقدارها 0.0001kg ؟

٩. تعطلت سيارتك، فقمت بدفعها. إذا كانت كتلة سيارتك 800kg، ما هو مقدار كمية حركتها عندما تتحرك للأمام بسرعة 3m/s (11km/h)؟

١٠. تبدأ بدفع السيارة للأمام (انظر مسألة ٩). بإهمال الاحتكاك، ما مقدار الزمن الذي ستحتاجه حتى تدفع سيارتك لتصل لسرعة 3m/s على سطح مستوٍ إذا بذلت عليها قوة ثابتة مقدارها 200N؟

١١. عندما تسير سيارتك بسرعة 3m/s (انظر مسألة ٩ و ١٠)، ما مقدار طاقتها الحركية الانتقالية؟

١٢. لا أحد يقود سيارتك (انظر مسألة ٩ و ١٠ و١١) فتصطدم بسيارة ساكنة بسرعة 3m/s. تتوقف سيارتك بعد زمن قدره 0.1s. ما القوة التي بذلتها السيارة الساكنة على سيارتك لتوقفها بهذه السرعة؟

١٣. أنت في حلبة التزلج مع صديقك الذي يزن ضعف وزنك. يقف كلاكما بلا حراك في منتصف الحلبة بحيث يساوي مجموع كميتي حركتكما صفرا. عندها يدفع كل منكما الآخر وتبدءان بالابتعاد عن بعضكما. إذا كانت كمية حركتك في هذه اللحظة 450kg.m/s باتجاه اليسار، ما هي كمية حركة صديقك؟

الفصل ٣

الأجسام الميكانيكية الجزء الأول

الآن وبعد أن درسنا قوانين الحركة، نستطيع أن نبدأ باستخدام تلك القوانين لتفسير سلوك الأشياء في حياتنا اليومية. لكن في حين نستطيع فهم بعض من المميزات الرئيسية في عمل لعبة عربة، أو آلة وزن، أو مصعد تزلج، إلا أننا مازلنا نفقد العديد من المفاهيم الميكانيكية المهمة في العالم من حولنا. في هذا الفصل، سننظر في بعض هذه المفاهيم الإضافية.

أحد أهم الأشياء هو التسارع. إذا تعاملنا مع التسارع بسلبية فإنه قد يكون غير مثير جدا: ندفع العربة فتتسارع. ولكن إذا فكرنا بالمفهوم بفعالية أكبر – مثلا، إذا تصورنا أنفسنا في أفعوانيات الملاهي وهي تهبط من أعلى أول مرتفع – عندها يصبح التسارع أكثر إثارة. في الحقيقة، قد نحتاج حتى أن نمسك بقبعاتنا.

تجربة: أرجحة الماء فوق رؤوسنا

لفحص بعض من الآثار المبتكرة للتسارع، حاول أن تقوم بتجارب بدلو ماء. إذا كنت حذرا، فيمكنك أرجحة الدلو فوق رأسك رأسا على عقب دون أن تسكب قطرة من الماء. أثناء العملية، سيتضح عدداً من المفاهيم الفيزيائية المهمة.



بإذن من لوي بلومفيلد

للقيام بهذه التجربة، ستحتاج دلواً ذا مقبض (يمكنك استبداله بوعاء مماثل؛ حتى كوب من البلاستيك سينفع لو ضاق عليك الأمر). املأ الدلو جزئياً بالماء ثم امسكه من المقبض بحيث يكون متدلياً بجانبك.

الآن أرجع الدلو للخلف حوالي ثمن دورة ثم أحضره للأمام بسرعة. في حركة سلسة ومرنة واحدة أرجح الدلو للأمام، ثم للأعلى، ثم من فوق رأسك. استمر في هذه الحركة لتكمل الدورة بجعل الدلو يلف خلفك إلى أن يصل للأمام مرة أخرى. ستحتاج أن تلف الدلو بسرعة لكي تتجنب التبلل بالماء. عندما تستمر في لف الدلو مرة بعد مرة، ستلاحظ أن الماء يظل في الدلو حتى عندما يكون فوق رأسك مقلوبا. لماذا لا يسقط الماء؟

يمكنك أن تأخذ هذه التجربة خطوة للأمام بتدوير الدلو بسرعات مختلفة - أي، إذا لم تمانع أن تتبلل. أولا: حاول أن تتنبأ ماذا سيحدث لو قمت بتدوير الدلو بسرعة أقل أو بسرعة أعلى. الآن قم بالتجارب ولاحظ ماذا يحدث. هل حققت التجارب تنبؤاتك؟

عندما تدير الدلو فوق رأسك، حاول أن تقيس شدة جذب الدلو ليدك. هل قوة الشد أقوى أم أضعف عندما تدير الدلو بسرعة أقل؟ بسرعة أكبر؟ هل هناك أي علاقة بين الجذب للأعلى الذي تشعره من قبل الدلو المقلوب وميل الماء للبقاء داخل الدلو؟

يمكنك أن تغير في هذه التجربة بعدة طرق، جرّب أن تدير كوباً من البلاستيك تمسكه بأصابعك، أو جرب أن تضع كأساً مملوءةً بالعصير داخل الدلو وقم بتدوير الجسمين مع بعضهما. في الحالة الأخيرة، ستجد أن العصير يظل في الكأس والكأس تظل في قاع الدلو، حتى عندما يكون الدلو مقلوباً رأساً على عقب.

بالمناسبة، أصعب جزء في هذه الخدع هو التوقف. لتجنب كارثة، ستحتاج أن تقوم بنفس الشيء الذي قمت به عندما بدأت التجربة، ولكن بالعكس. أوقف الدلو بطريقة سلسة وتدريجية حوالي ثمن دورة أمامك، ثم دع الدلو يعود بحرية متدليا بجانبك. إذا قمت بتوقيف الدلو فجأة، فإن الماء، أو العصير، أو الكأس سينسكب أو يتحطم. لماذا تظن أن هذا يحدث؟

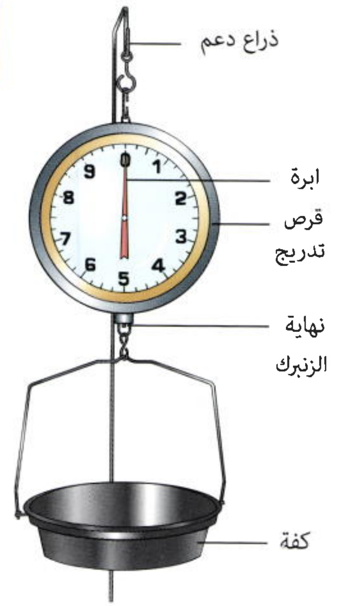
دليل الفصل

في هذا الفصل، سندرس ثلاثة أنواع من الأشياء الموجودة في حياتنا اليومية: (١) الموازين الزنبركية، (٢) الكرات المرتدة، (٣) و دوّامات الملاهي والأفعوانيات (سكك الحديد المرتفعة في مدينة الألعاب). في قسم الموازين الزنبركية، سنراجع العلاقة بين الكتلة والوزن ونستكشف كيف يمكن أن يُستخدم التغيير في الزنبرك لقياس وزن الجسم. في قسم الكرات المرتدة، سندرس كيف يمكن للكرات أن تخزن الطاقة وتعيدها وكيف أن ارتدادها يعتمد على كل من خصائصها الذاتية وخصائص الأجسام التي تصطدم بها. وفي قسم دوّامات الملاهي والأفعوانيات، سننظر كيف أن التسارع يتسبب في نشوء قوى محسوسة شبيهة بالجاذبية يمكن أن تجعلنا نصرخ بهجة في مدينة الملاهي. لرؤية عرض كامل حول ما سنتطرق له في هذا الفصل، يمكنك أن تقفز لملخص الفصل في صفحة ١٠٢.

إن المفاهيم التي توضحها هذه الأشياء يمكنها أن تفسر ظواهر أخرى أيضا. يتصرف أي جسم صلب تقريباً، من مرتبة السرير (ذي الزنابك) إلى لوحة الغطس إلى العجلة، مثل زنبرك الميزان الزنبركي عندما تقوم بدفعه. الكرات المرتدة تقدم نظرة للتصادمات ستساعدك في فهم ما يحدث عند تصادم سيارتين أو عندما تضرب مطرقة مسمارا. والأحاسيس المرتبطة بالتسارع الذي تشعر به في الأفعوانية موجودة أيضاً عندما تركب الطائرات، أو القطارات الكهربائية النفقية، أو مجموعة الأرجوحات.

عندما يتعلق الأمر بفيزياء الأشياء اليومية، في الحقيقة لا يوجد شيء جديد تحت الشمس.

٣-١ الموازين الزنبركية



كم هي كمية المادة الموجودة بجسمك؟ من يوم لآخر، واعتماداً على كمية الطعام الذي تأكله، تبقى كمية المادة في جسمك تقريبا نفسها. ولكن كيف يمكنك معرفة مقدارها؟ المقياس الأفضل للكمية هو الكتلة: كيلوجرام من الذهب، أو اللحم، أو الحبوب، أو أنت. الكتلة هي مقياس القصور الذاتي للجسم، وكما رأينا في قسم ١-١، لا تعتمد على البيئة المحيطة بالجسم أو الجاذبية. فعلبة البسكويت ذات الكيلوجرام الواحد دائما لها كتلة مقدارها كيلوجرام واحد، بغض النظر عن أي مكان في الكون تأخذها إليه.

ولكن يصعب قياس الكتلة مباشرة. علاوة على ذلك، فإن مفهوم الكتلة يبلغ من العمر فقط ثلاثمائة عام تقريباً. بناء على ذلك، بدأ الناس بتحديد مقدار المادة في الجسم بقياس وزنه. بعد حين، أصبحت الموازين الزنبركية إحدى أبسط الأدوات وأكثرها عملية لإنجاز هذه المهمة، ومازالت اليوم موجودة في دورات المياه والبقالات. هي بالفعل تحتوي على زنابك، بالرغم أنها في العادة تكون مخفية عن الأنظار.

أسئلة للتفكير

ما هي العلاقة بين كتلتك ووزنك؟ إذا أصبحت جاذبية الأرض ضعف قوتها، كيف ستتأثر كتلتك؟ ماذا عن وزنك؟ هل القفز للأعلى وللأسفل يغير أي من كتلتك أو وزنك؟ إذا وقفت على زنبرك قوي، كيف يؤثر وزنك على شكل الزنبرك؟ لماذا يجب أن تكون هناك علاقة بين وزنك ومقدار انثناء الزنبرك؟

تجارب يمكن القيام بها

ابحث عن ميزان زنبركي مثل النوع المستخدم في البقالات وراقب كفة الميزان ومؤشر الوزن عندما تضع الأشياء في الكفة. ماذا يحدث للكفة عندما تملؤها؟ هل يمكنك إيجاد علاقة بين ارتفاع الكفة والوزن المذكور بالميزان؟ إذا أسقطت شيئا في الكفة بدلا من وضعه بلطف، كيف يستجيب الميزان لذلك؟ لماذا يتذبذب مؤشر الميزان ذهابا وإيابا بطريقة متناغمة؟ ماذا يحدث لطاقة الجذب الكامنة للجسم المسقط؟

والآن ابحث عن ميزان زنبركي أرضي - النوع القصير والمستوي الذي له إبرة دورانية. قف عليه، لماذا يقرأ وزنك الصحيح فقط عندما تقف ثابتا؟ إذا قفزت للأعلى، كيف تتغير قراءة الميزان؟ ماذا عن لو تركت نفسك تسقط؟ قم بالقفز بلطف، ما هي المقارنة بين متوسط قراءات الميزان ووزنك الطبيعي؟ هل القفز في الحقيقة يغير من وزنك؟ يمكنك أيضا أن تغير من قراءة الميزان بدفع الأرض، أو الحائط، أو أي جسم آخر قريب. في أي اتجاه يجب أن تدفع لتزيد من قراءة الميزان؟ لتنقصها؟ عندما تغير القراءة بهذه الطرق، هل أنت بالفعل تغير وزنك؟

لماذا يجب أن تقف ساكناً على الميزان

كلما تقف على ميزان في دورة المياه أو تضع بطيخاً في ميزان البقالة، فأنت تقيس وزناً. وزن الجسم هو القوة المؤثرة عليه من قبل الجاذبية، في العادة الجاذبية الأرضية. عندما تقف على ميزان أرضي، فإن الميزان يقيس مقدار القوة للأعلى التي يجب أن يبذلها عليك لكي يمنعك من التحرك للأسفل باتجاه مركز الكرة الأرضية. كما في أكثر الموازين التي ستصادفها، يستخدم الميزان الأرضي زنبركاً ليوفر هذه القوة الداعمة للأعلى. إذا كنت ساكنا، فأنت لا تتسارع، لذا فإن وزنك للأسفل والقوة للأعلى من الزنبرك يجب أن يلغي بعضها البعض؛ أي يجب أن يكونا متساويين في المقدار ومتعاكسين في الاتجاه حتى يؤدي مجموعهما لمحصلة قوة مقدارها صفر. بناء على ذلك، بالرغم من أن الميزان يعرض في الحقيقة كمية القوة للأعلى المبذولة عليك، إلا أن هذا المقدار هو أيضاً مقياس دقيق لوزنك.

هذا الاختلاف غير الملحوظ بين وزنك الحقيقي وما يعرضه الميزان له أهمية. فبينما يعتمد وزن الجسم فقط على بيئته الجاذبية، وليس على حركته، إلا أن عملية الوزن نفسها حساسة جدا للحركة. إذا تسارع أي شيء أثناء عملية الوزن، فإن الميزان قد لا يعرض الوزن الحقيقي للجسم. على سبيل المثال، إذا قفزت مراراً أثناء وقوفك على ميزان، فإن قراءة الميزان ستتفاوت بدرجة كبيرة. أنت تتسارع، لذا فإن وزنك للأسفل والقوة الدافعة

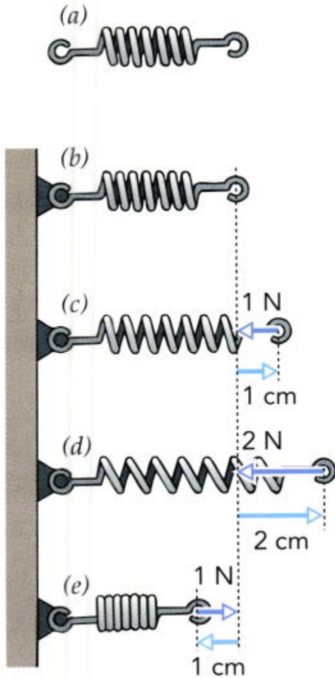
للأعلى من الميزان لن تلغي بعضها. إذا أردت قياساً دقيقاً لوزنك عليك أن تقف بلا حراك.

ولكن حتى لو وقفت بلا حراك، فإن الوزن ليس طريقة مثالية لتحديد كمية المادة الموجودة في جسمك، وذلك لأن وزنك يعتمد على بيئتك. إذا وزنت نفسك دائما في نفس المكان، فالقراءة ستكون ثابتة، طالما أنك لا تأكل درزينة من الدونات المحشية بالمربى للغداء بشكل دوري. ولكن إذا انتقلت للقمر، حيث الجاذبية أضعف، فستزن فقط سدس ما تزنه على الأرض. حتى الانتقال لمكان آخر على الأرض سيؤثر على وزنك: تبرز الأرض للخارج قليلا عند خط الاستواء، والجاذبية هناك حوالي 0.5% أضعف منها عند الأقطاب. هذا التغير، إضافة لتأثير التسارع الطفيف نتيجة دوران الأرض، يعني أن الميزان سيقرأ أقل بمقدار 1.0% عندما تنتقل من القطب الشمالي لخط الاستواء. من الواضح أن الانتقال للجنوب لا يعد خطة مفيدة لتخفيف الوزن.

تحقق من فهمك # ١: تجّار الفضاء (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

ستقوم بفتح شركة تصدر الطعام الفاخر من الأرض إلى القمر. تريد أن تكون المعلومات على ملصقات التغليف دقيقة في كلا الموقعين. كيف يجب عليك أن تصف كمية الطعام في كل تغليف – بالكتلة أم بالوزن؟

شدّ الزنبرك



شكل ١،١،٣: خمسة زنابك متماثلة. أطراف زنبرك (أ) حرة بحيث يمكنه أن يتخذ طوله المتزن. الأطراف اليسرى للزنابك الأخرى مثبتة بحيث تستطيع أطرافها اليمنى فقط أن تتحرك. عندما يبتعد الطرف الحر من زنبرك (ب) عن موضع اتزانه الأصلي (ج، و د، و هـ)، فإن الزنبرك يبذل قوة إرجاع على ذلك الطرف تتناسب مع المسافة بين موضعه الجديد وموضع اتزانه الأصلي.

الآن أنت تعرف أنك إذا وضعت بطيخة في كفة ميزان البقالة وقرأت وزنها من مؤشر الميزان، فإن الميزان في الواقع يصف مقدار القوة للأعلى التي يبذلها زنبركه على البطيخة. في حين تستطيع عربة تسوّقك أن تدعم البطيخة بنفس المقدرة أيضا، لكن لا توجد طريقة لتحديد مقدار القوة للأعلى التي تبذلها العربة على البطيخة. هنا يكمن جمال وفائدة الزنبرك: توجد علاقة بسيطة بين طوله والقوى التي يبذلها على أطرافه. يمكن إذاً للميزان الزنبركي أن يحدد مقدار القوة التي يبذلها على البطيخة بقياس طول زنبركه.

الزنابك الموضحة في الشكل (١،١،٣) تتكون من سلك ملفوف يسحب أطرافه للداخل عند شدّه ويدفعها للخارج عند ضغطه. إذا لم يكن ملف الزنبرك مشدودا ولا مضغوطا، فإنه لا يبذل أي قوة على أطرافه.

الزنبرك العلوي (شكل ١،١،٣ أ) ليس مشدودا ولا مضغوطا، لذا فإنه إذا وضع على طاولة لمنعه من السقوط، فإن أطرافه تظل ساكنة. هذه الأطراف في حالة اتزان – تواجه محصلة قوة صفرية. كما توحي العبارة «محصلة قوة صفرية»، فإن التوازن يحدث كلما كان مجموع القوى المؤثرة على جسم صفرا بالضبط حتى لا يتسارع الجسم. عندما تجلس بلا حراك في مقعد، على سبيل المثال، فأنت في حالة اتزان.
الزنبرك في الشكل (١،١،٣ أ) هو أيضا عند طوله المتزن، أي طوله الطبيعي إذا تركته دون تدخل. كيفما تحاول أن تشوه هذا الزنبرك، فإنه يحاول العودة لطوله المتزن، فإذا شددته بحيث يكون أطول من طوله المتزن، فإنه سيشدّ أطرافه للداخل. إذا ضغطته ليصبح أقصر من طوله المتزن، فإنه سيدفع أطرافه للخارج.

دعنا نعلق الطرف الأيسر من زنبركنا بدعامة (شكل ١،١،٣ ب) وننظر لسلوك طرفه الأيمن الحر. في ظل غياب أي شيء يدفع أو يشدّ الزنبرك، فإن هذا الطرف الحر سيكون في حالة اتزان في موضع معين – في موضع الاتزان. بما أن طرف الزنبرك يعود بطبيعته لموضع الاتزان إذا قمنا بشده أو ضغطه ثم تركناه، فإن الطرف في حالة اتزان مستقر.
لكن ماذا يحدث إذا شددنا الطرف الحر إلى اليمين دون تركه؟ يبذل الزنبرك الآن قوة ثابتة إلى الداخل على ذلك الطرف، محاولا رده لموضع اتزانه الأصلي. كلما قمنا بشد الزنبرك أكثر، بذل قوة أكبر للداخل على الطرف. هذه القوة الداخلية تتناسب بالضبط مع بُعد الطرف المشدود عن موضع اتزانه الأصلي. بما أن طرف الزنبرك في الشكل (١،١،٣ ج) قد سحب لليمين مسافة 1cm عن موضع اتزانه الأصلي، فالزنبرك الآن يشد هذا الطرف

لليسار بقوة مقدارها 1N؛ إذا سحب بدلا من ذلك 2cm إلى اليمين، كما في شكل (١,١,٣ د)، فيسحبه الزنبرك إلى اليسار بقوة مقدارها 2N. هذا التناسب صالح أيضا عندما نضغط الزنبرك: في الشكل (١,١,٣ هـ) ، دُفع الطرف لليسار بمقدار 1 cm، ويدفع الزنبرك عليه باتجاه اليمين بقوة مقدارها 1N.

بالتالي، القوة المبذولة من قبل زنبرك ملفوف لها ميزتان مثيرتان، أولاً: تتجه هذه القوة دائما بحيث تعيد الزنبرك لطوله المتزن. نسمي هذا النوع من القوة بقوة الإرجاع لأنها تعمل على إرجاع الزنبرك للاتزان. ثانياً: تتناسب قوة إرجاع الزنبرك مع مقدار التشوه الذي حصل له (الشد أو الضغط) عن طوله المتزن.
يعبر عن هاتين الملاحظتين في قانون هوك، نسبة للعالم الانجليزي روبرت هوك، والذي عرضه في أواخر القرن السابع عشر.
يمكن كتابة هذا القانون بالمعادلة اللفظية:

قوة الإرجاع = - ثابت الزنبرك × التشوه (١,١,٣)

ورمزياً:

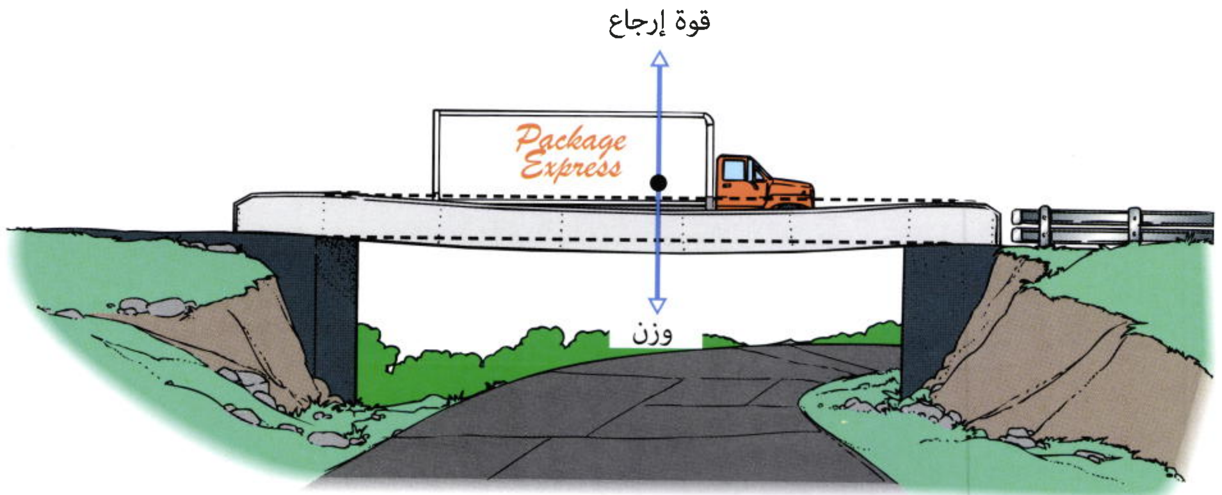
$$\mathbf{F} = -k \cdot x$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما زدت في عصر لفة المناشف الورقية، دفعتْ عكسيا بشدة أكثر.

ثابت الزنبرك هنا k، هو مقياس لصلابة الزنبرك. كلما زاد ثابت الزنبرك – أي، زادت صلابته – زادت قوة الإرجاع التي يبذلها الزنبرك لتشوه معين. الإشارات السالبة في هذه المعادلات تبين أن قوة الإرجاع تشير دائما لاتجاه معاكس للتشوه.

قانون هوك
تتناسب قوة الإرجاع التي يبذلها جسم مرن مع مقدار التشوه الذي حصل له عن حالة اتزانه.

تتمايز الزنابك بمقدار صلابتها، والذي يقاس بثابت الزنبرك الخاص بها. بعض الزنابك مرنة ولها ثابت زنبرك صغير – على سبيل المثال، الزنبرك الذي يدفع شرائح الخبز من حماسة الخبز، والذي يمكنك ضغطه بيدك بسهولة. البعض الآخر، مثل



شكل ٢,١,٣ : يرتخي جسر فولاذي تحت تأثير وزن شاحنة. ينحني الجسر للأسفل إلى أن تتعادل قوة الإرجاع للأعلى التي يبذلها الجسر مع وزن الشاحنة.

الزنابك الكبيرة التي تعلق هيكل السيارة فوق العجلات، تكون صلبة ولها ثابت زنبرك كبير. ولكن بغض النظر عن الصلابة، فإن جميع الزنابك تتبع قانون هوك.

قانون هوك هو قانون عام بطريقة رائعة وليس مقصورا على سلوك الزنابك الملفوفة. أي شيء تقريباً تقوم بتشويهه سيشد أو يدفع باتجاه معاكس وبقوة تتناسب مع مقدار التشويه الذي أحدثته بعيدا عن طوله المتزن- أو، في حالة الجسم المعقد، شكله المتزن. الشكل المتزن هو الشكل الذي يتخذه الجسم عندما لا يتعرض لأي قوة خارجية. عندما تـحني غصن شجرة، فإنه سيدفع عكسيا بقوة تتناسب مع مقدار انـحنائه. إذا شددت رباطاً مطاطياً، فإنه سيشد عكسيا بقوة تتناسب مع مقدار شده، إلى حد ما، إذا ضغطت كرة، فإنها ستدفع للخارج بقوة تتناسب مع مقدار انضغاطها.

إذا أحنت شاحنة ثقيلة جسرا للأسفل، فإن الجسر سيدفعها للأعلى بقوة تتناسب مع مقدار انـحنائه (شكل ٢,١,٣).

ومع ذلك، فهناك حد لقانون هوك. إذا شوهت جسماً أكثر مما ينبغي، فإنه في الغالب سيبذل قوة أقل من التي يحتمها قانون هوك، وهذا لأنك تكون قد تجاوزت حد المرونة للجسم ومن المحتمل أن تكون قد أحدثت تشوهاً دائماً له أثناء العملية. إذا شددت زنبركاً بقوة، فأنت ستمدده للأبد؛ إذا دفعت غصناً بقوة، ستكسره. ولكن طالما بقيت داخل حد المرونة، فإن جميع الأشياء تقريباً ستخضع لقانون هوك – الحبل، والمسطرة، والبرتقالة، والترامبولين.

يتطلب تشويه الزنبرك القيام بشغل. عندما تشد زنبركاً بيدك، بسحب أطرافه للخارج، فأنت تنقل بعضاً من طاقتك للزنبرك. يخزن الزنبرك هذه الطاقة كطاقة كامنة مرنة. إذا عكست الحركة، فإن الزنبرك يعيد معظم هذه الطاقة ليدك، بينما تتحول كمية صغيرة لطاقة حرارية نتيجة تأثيرات احتكاكية داخل الزنبرك نفسه. يتطلب الشغل أيضا لضغط، أو لانـحناء، أو لف الزنبرك. باختصار، الزنبرك الذي يشوه عن شكله المتزن يحتوي دائماً على طاقة كامنة مرنة.

تحقق من فهمك # ٢: هل أحد يريد السقوط؟ (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

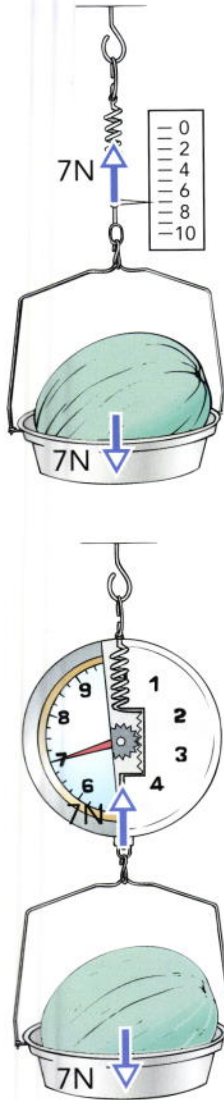
عندما تشاهد أشخاصاً يقفزون من لوحة القفز في مسبح، تلاحظ أنها تنحني للأسفل بمقدار يتناسب مع وزن كل غواص، فسر ذلك.

دقق في أرقامك #١ : الإحساس بالهبوط (للإجابة، انظر صفحة ١٠٤)

تستضيف حفلة في شقتك بالطابق الثالث، عند وقوف أول عشرة ضيوف في غرفة جلوسك تلاحظ أن الأرضية ارتخت في المنتصف بمقدار 1 سنتيمتر. ما مقدار ارتخاء الأرضية عندما يقف عشرون شخصا عليها؟ عندما يقف مائة شخص عليها؟

كيف يقيس ميزان البقالة المعلق الوزن

نـحن الآن مستعدون لفهم كيفية عمل الميزان الزنبركي. تخيّل ميزاناً زنبركياً معلقاً كالذي يستخدم في وزن الفواكه والخضار. يوجد داخل الميزان زنبرك ملفوف، معلق بالسقف من طرفه العلوي (شكل ٣,١,٣)، ومعلق بطرفه السفلي كفة. من أجل تبسيط الأمر، تخيّل أن هذه الكفة لها وزن طفيف أو عديمة الوزن. في ظل عدم وجود قوة تشده للأسفل، فإن زنبرك الميزان يكون عند طوله المتزن، والكفة لا تواجه أي محصلة قوة وتكون



شـكل ٣,١,٣: ميزانـان زنبركيـان يوزنان بطيخـة. يوازن كل ميـزان وزن البطيخة للأسـفل بقوة الزنبرك للأعلى. كلما كانت البطيخة أثقل، زادت استطالة الزنبرك قبل أن يبـذل قوة للأعلى كافيـة لموازنة وزن البطيخـة. الميزان العلوي له مؤشر يوضح مقدار اسـتطالة الزنبرك وبالتـالي مقدار وزن البطيخـة. الميـزان السـفلي له لوح مسنن وترس صغير يقوم بإدارة إبرة على قرص مدرج. عندما يتحرك اللوح المسـنن الشبيه بأسـنان المشـط للأعلى وللأسفل يقوم بإدارة الترس الصغير.

في موضع اتزانها المستقر. إذا أزحت الكفة للأعلى أو للأسفل ثم تركتها، فإن الزنبرك سيدفعها لإعادتها لموضعها.

عندما تضع بطيخة في الكفة، فإن وزن البطيخة يدفع الكفة للأسفل. تبدأ الكفة بالهبوط وحينما تقوم بذلك يستطيل الزنبرك ويبدأ ببذل قوة للأعلى على الكفة. كلما زادت استطالة الزنبرك، زادت هذه القوة المبذولة للأعلى إلى أن يصل في نهاية الأمر أن يستطيل الزنبرك بشكل كافٍ بحيث تدعم قوته للأعلى وزن البطيخ تماماً. الكفة الآن في موضع اتزان مستقر جديد – ومرة أخرى تواجه محصلة قوة مقدارها صفر.

ولكن كيف يمكن للميزان أن يحدد وزن البطيخ؟ إنه يستخدم قانون هوك. بمجرد أن تتخذ الكفة موضع اتزانها الجديد، حيث يوازن وزن البطيخ قوة شد الزنبرك للأعلى تماماً، فإن مقدار استطالة الزنبرك هو مقياس دقيق لوزن البطيخ.

تختلف الموازين الموضحة في الشكل (٣،١،٣) فقط في طريقة قياسها لمقدار استطالة الزنبرك عن طوله المتزن. يستخدم الميزان العلوي مؤشراً مثبتاً في نهاية الزنبرك، بينما يستخدم الميزان السفلي نظام تروس يتكون من ترس صغير ولوح مسنن والذي يقوم بتحويل الحركة الخطية الصغيرة للزنبرك المشدود إلى حركة دورانية ملحوظة في إبرة قرص التدريج. فاللوح المسنن هو سلسلة من الأسنان المتباعدة عن بعضها البعض بمسافات منتظمة متصلة بطرف الزنبرك السفلي؛ أما الترس فهو عجلة مسننة متصلة بإبرة قرص التدريج. عندما يستطيل الزنبرك، فإن اللوح المسنن يتحرك للأسفل، وتؤدي أسنانه لتدوير الترس. كلما ابتعد اللوح المسنن، دار الترس أكثر، وكانت قراءة الوزن الذي توضحه الإبرة أكبر.

كل من هذه الموازين الزنبركية يعطي رقماً لوزن البطيخة التي وضعتها في الكفة. من أجل أن يكون لهذا الرقم معنى، فإنه يجب معايرة الميزان. المعايرة هي عملية مقارنة أداة محلية أو مرجع بمقياس عام متفق عليه لضمان الدقة. لمعايرة ميزان زنبركي، فإن الأداة أو مكوناتها المرجعية يجب أن تقارن بأوزان قياسية. يجب أن يقوم شخص ما بوضع أوزان قياسية في الكفة وقياس مقدار استطالة الزنبرك. كل زنبرك يختلف عن الآخر، بالرغم من محاولة صانعي الزنبرك لجعل جميع الزنابك متماثلة بقدر الإمكان.

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ٤،١،٣: عندما تقف على هذا الميزان الأرضي، فإن سطحه يتحرك للأسفل بعض الشيء ويضغط على زنبرك صلب. يتناسب مقدار هذا الانضغاط مع وزنك، والذي يُعرض عن طريق قرص على اليسار. الروافع الموجودة داخل الميزان تجعله غير حساس لموضع وقوفك بالضبط عليه.

تحقق من فهمك # ٣: إنزال الميزان (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

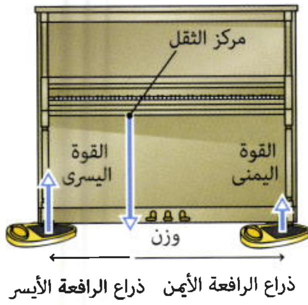
قمت بشد كفة ميزان معلق في بقالة للأسفل لمسافة 1cm ، فإن الميزان سيقرأ وزناً مقداره 5N (حوالي 1.1 lbf) لمحتويات كفته. إذا شددت الكفة للأسفل لمسافة 3cm، فما هو الوزن الذي سيقرؤه؟

الموازين الأرضية المرتدة

كما لاحظنا سابقا، أكثر أنواع الموازين الأرضية الشائعة هي أيضا ميزان زنبركي (شكل ٤،١،٣). عندما تقف على هذا النوع من الموازين، فأنت تضغط سطحه فتقوم روافعه الداخلية بسحب زنبركه الخفي. يستطيل هذا الزنبرك إلى أن يبذل عليك – عن طريق الروافع - قوة للأعلى تساوي وزنك.

في نفس الوقت، تقوم ميكانيكية اللوح المسنن والترس الصغير داخل الميزان بإدارة قرص مطبوع عليه أرقام. عندما يتوقف القرص عن الحركة، يمكنك قراءة أحد هذه الأرقام من خلال نافذة في الميزان. بما أن الرقم الذي تقرؤه يعتمد على مقدار استطالة الزنبرك، فإن هذا الرقم يشير إلى وزنك.

ولكن هذا القرص يتأرجح ذهابا وإيابا حول وزنك الفعلي قبل أن يستقر. يتحرك القرص لأنك تتأرجح للأعلى وللأسفل بينما يتخلص الميزان من الطاقة الفائضة تدريجيا. أول ما تقف على سطح الميزان، فإن زنبرك الميزان لم يستطل بعد ولم يدفعك للأعلى على الإطلاق. أنت تبدأ بالهبوط. حينما تهبط، يستطيل الزنبرك ويبدأ الميزان بدفع قدميك للأعلى. ولكن في الوقت الذي تصل فيه للطول المتزن، حيث يكون الميزان داعما لوزنك تماما، تستمر في حركتك للأسفل بسرعة فتتعدى نقطة الاتزان. فيقرأ الميزان أكثر من وزنك.



شكل ٥،١،٣: يمكنك وزن بيانو منصوب بوضع ميزان زنبركي تحت كل من طرفيه. سيبذل كل ميزان قوة للأعلى على البيانو لدعمه، ويساوي وزن البيانو مجموع هاتين القوتين، كما يقيسها الميزانان.

الآن سيجعلك الميزان تتسارع للأعلى. يتباطأ هبوطك، وقريبا تبدأ بالصعود للأعلى باتجاه الاتزان. مرة أخرى تتخطى حركتك الارتفاع الصحيح، ولكن الآن يقرأ الميزان وزناً أقل من وزنك. أنت تتأرجح للأعلى وللأسفل لأن لك طاقة فائضة تنتقل ذهابا وإيابا بين طاقة الجذب الكامنة، والطاقة الحركية، والطاقة الكامنة المرنة. هذا التأرجح يستمر إلى أن يقوم احتكاك الانزلاق في الميزان بتحويل جميع الطاقة إلى طاقة حرارية. عندها فقط يتوقف التأرجح ويقرأ الميزان وزنك الصحيح.

إن التأرجح الذي تواجهه حول هذا التوازن المستقر هو حركة رائعة، وهي حركة سندرسها بالتفصيل عندما نفحص الساعات في الفصل التاسع. أنت فعليا كتلة مدعومة من قبل زنبرك، وارتفاعك وانخفاضك المتناغم هو متذبذب توافقي. المتذبذبات التوافقية مهمة وشائعة في الطبيعة، لذا فإن الفصل التاسع مخصص كلياً لها. يمكنك الانتظار لمعرفة التفاصيل، ولكن هناك ميزتان لحالتك الحالية سندرسهما الآن.

أولا: تكون طاقتك الكامنة الكلية عند أقل قيمة لها عندما تكون أنت عند التوازن المستقر. على الرغم من اشتراك كل من طاقة الجذب الكامنة والطاقة الكامنة المرنة ، فإن مجموعهما يتزايد عندما تنحرف عن الاتزان. بما أن الجسم يتسارع دائما لتقليص طاقته الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن، فأنت دائما تتسارع باتجاه التوازن المستقر.

ثانيا: تصل طاقتك الحركية للقمة عندما تمر أنت من خلال التوازن المستقر، وكونك تتسارع باتجاه ذلك التوازن حتى لحظة وصولك له، يجعلك تتحرك بسرعة عالية فتعبره. ولكن بمجرد أن تتعداه تبدأ بالتسارع نـحوه مرة أخرى. ذلك التسارع يكون خلفيا، أي معاكسا لسرعتك، لذا فأنت تتباطأ. وبالتالي وصلت قمة سرعتك وطاقتك الحركية لحظة عبورك من خلال نقطة التوازن. عندما تتأرجح للأعلى وللأسفل منتظرا أن يبدد الميزان طاقتك الفائضة، يتحول هذا الفائض ذهابا وإيابا بصورة متناغمة بين أشكال الطاقة الحركية والكامنة.

تحقق من فهمك # ٤: مثقّل للأسفل

(للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

عندما تقف على سطح ميزان زنبركي أرضي، تستطيع أن تشعر بحركته الطفيفة للأسفل. ما علاقة المسافة التي يتحركها سطح الميزان للأسفل بالوزن الذي يعرضه؟

معتقدات خاطئة شائعة: الاتزان والسكون

المعتقد الخاطئ:

الجسم عند الاتزان ساكن.

القرار:

الجسم عند الاتزان لا يتسارع، ولكن سرعته قد لا تكون صفرا. إذا كان الجسم متحركا عندما وصل للاتزان فإنه سيتحرك بسرعة ثابتة.

استعمال عدة موازين في وقت واحد

يكفيك ميزان واحد، ولكن كيف يمكنك وزن بيانو منصوب؟ إنه ثقيل جدا وصعب وضعه على ميزان واحد، ولكن ميزانين سيؤديان الغرض. إذا وضعت ميزاناً واحداً تحت كلا جانبي البيانو، فإن الميزانين سيعملان معا لدعم وزنه. كل ميزان سيعرض مقدار القوة للأعلى التي يبذلها على البيانو، لذا فإن مجموع القياسين سيساوي وزن البيانو الكلي (شكل ٥,١,٣).

ستعتمد القراءة المحددة للميزانين على موقع مركز ثقل البيانو. مركز ثقله هو الموقع الفعلي لوزنه ويتطابق مع مركز كتلته. بما أن أوتار البيانو الطويلة والثقيلة تقع على الجانب الأيسر، فإن مركز ثقل البيانو على يسار منتصفه الهندسي. نتيجة لذلك، فإن الميزان الأيسر يجب أن يدعم مقداراً أكبر من وزن البيانو وقراءته تكون أكبر من قراءة الميزان الأيمن.

يمكننا تفسير القراءات المختلفة بأخذنا في الاعتبار الحركة الدورانية. مثل لعبة الميزان في القسم ٢-١، فإن البيانو يمكنه الدوران حول مركز كتلته وسيخضع لتسارع دوراني استجابة لمحصلة عزم الدوران. لتجنب التسارع الزاوي كي يستطيع أن يظل ساكنا على الموازين، فإن البيانو يجب أن يكون في اتزان دوراني، أي يجب أن يخضع لمحصلة عزم دوراني صفرية. بما أن وزن البيانو يؤثر فعليا عند مركز ثقل البيانو، فليس له ذراع رافعة ولا يبذل أي عزم على البيانو حول مركز كتلته، ولكن الميزانين يبذلان عزمين دورانيين على البيانو حول مركز كتلته. يدفع الميزان الأيسر طرف البيانو الأيسر للأعلى، وبالتالي ينتج عزماً دورانياً على البيانو باتجاه عقارب الساعة. من المعادلة ٣,١,٢، مقدار عزم الدوران هذا هو حاصل ضرب ذراع الرافعة الأفقية اليسرى في مقدار القوة اليسرى المتجهة للأعلى. بالمثل، ينتج الميزان الأيمن عزماً دورانياً على البيانو بعكس اتجاه عقارب الساعة ومقدار ذلك العزم الدوراني هو حاصل ضرب ذراع الرافعة الأفقية اليمنى في مقدار القوة اليمنى المتجهة للأعلى.

لكي يكون البيانو في اتزان دوراني، فإن هذين العزمين الدورانيين يجب أن يلغي بعضهما البعض؛ يجب أن يتساويا في المقدار، ولكن يتعاكسا في الاتجاه. سيكون مقداراهما متساويين عندما:

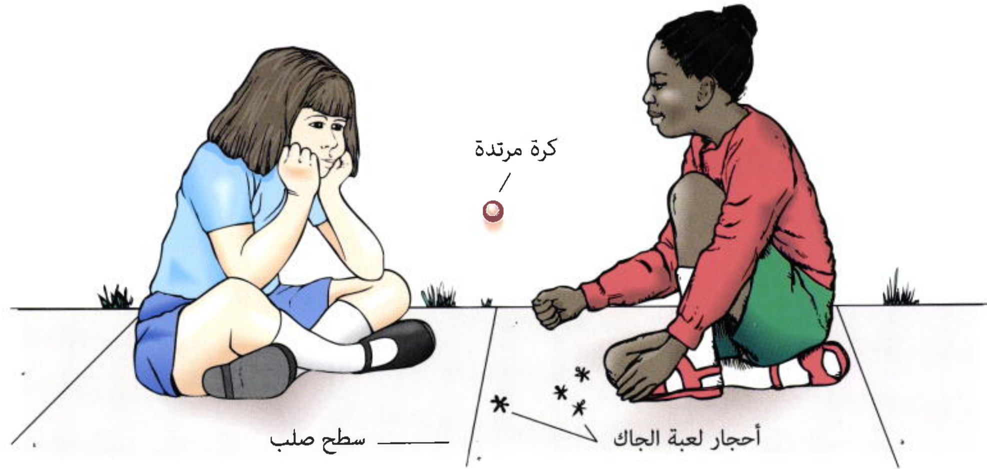
ذراع الرافعة اليسرى · القوة اليسرى = ذراع الرافعة اليمنى × القوة اليمنى

بما أن ذراع الرافعة اليسرى أقصر من ذراع الرافعة اليمنى، فإن القوة اليسرى يجب أن تكون أكبر تناسبيا من القوة اليمنى. لهذا تكون قراءة الميزان الأيسر أكبر من قراءة الميزان الأيمن.

هذا التأثير، حين يجب أن يدعم الميزان الذي يكون أدنى وأكثر قربا لمركز ثقل الجسم مقداراً أكبر من وزن الجسم، هو تأثير مألوف لأي شخص قام بنقل أجسام ثقيلة. إذا قمت أنت وصديقك بمحاولة حمل البيانو الموضح في الشكل (٥,١,٣)، فإن الشخص الذي يحمل الجانب الأيسر من البيانو سيتحمل العبء الأكبر. وإذا انحرف الجسم بحيث يكون مركز ثقله تقريباً فوق أحد الأشخاص الحاملين مباشرة، كما في شكل (١,٣,١)، فإن هذا الشخص سيدعم تقريبا وزن الجسم الكلي.

تحقق من فهمك #٥: لا حاجة للتفريغ (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

في مكان ما في حقيبتك الكبيرة يوجد عدد من الكتب الثقيلة جدا، كيف يمكنك تحديد موقع تلك الكتب من بين الملابس الأقل وزنا دون تفريغ الحقيبة كلها؟



٣-٢ الكرات المرتدة

إذا زرت متجر ألعاب أو أدوات رياضية، ستجد عدداً من الكرات المختلفة - كرة فريدة لكل لعبة رياضية أو لعبة كرة تقريباً. تختلف هذه الكرات ليس فقط في حجمها ووزنها، بعضها صلبة جداً، وأخرى أكثر ليونة؛ بعضها ملساء وأخرى خشنة أو قاسية. في هذا القسم سنركز مبدئياً على اختلاف آخر: المقدرة على الارتداد. فالكرة الفائقة، على سبيل المثال، ترتد بشكل رائع، بينما الكرة المطاطية الأسفنجية لا ترتد على الإطلاق. حتى الكرات التي تبدو متماثلة يمكن أن تكون مختلفة جدا: فكُرة التنس الجديدة ترتد بشكل أفضل من أخرى قديمة. سوف نبدأ هذا القسم باستكشاف هذه الاختلافات.

أسئلة للتفكير

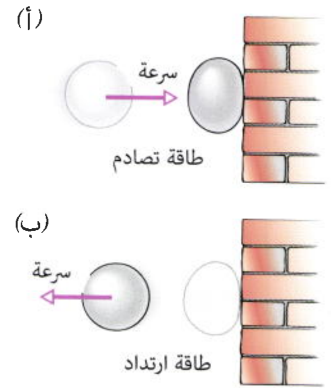
هل يمكن لكرة أن ترتد لارتفاع أعلى من الارتفاع الذي سقطت منه؟ أين تذهب الطاقة الحركية للكرة عند ارتدادها، وماذا يحدث للطاقة التي لا تظهر ثانية بعد الارتداد؟ ماذا يحدث عندما ترتد كرة من على جسم متحرك، مثل مضرب البيسبول؟ ما هو دور تركيب مضرب البيسبول في عملية الارتداد؟ هل يفرق أي جزء من مضرب البيسبول تصطدم به الكرة؟

تجارب يمكن القيام بها

أسقط كرة على سطح صلب وراقب ارتدادها. ماذا يحدث لشكل الكرة أثناء الارتداد؟ أمسك الكرة بيديك واضغط سطحها للداخل بأصابعك. ما هي العلاقة بين القوة التي تبذلها الكرة على أصابعك والمدى الذي استطعت أن تحدث انبعاجاً فيها للداخل؟ انبعاج الكرة يتطلب شغلاً. لماذا؟ كيف تتغير طاقة الكرة أثناء انبعاجها؟ ماذا يحدث لطاقة الكرة أثناء عودتها لشكلها الطبيعي (للاتزان)؟ أسقط الكرة من ارتفاعات مختلفة وانظر إذا كان بإمكانك أن تجد علاقة بسيطة بين ارتفاع الكرة الابتدائي والارتفاع الذي ارتدت إليه. والآن أسقط الكرة على سطح مرن، مثل وسادة، أو على سطح حيوي مثل بالون منفوخ. لماذا يغير السطح الذي سقطت عليه الكرة من طريقة ارتدادها عنه؟

طريقة ارتداد الكرة: الكرة كالزنبرك

من نواحٍ عديدة، تعد الكرات أجساماً مثالية. كيف ستكون معظم الألعاب الرياضية بدونها؟ كيف ستعمل الآلات الصناعية دون المحامل الدحروجية ذات الكرات التي تمنعها من الانطحان حتى التوقف؟ فأشكال الكرات البسيطة، وحركاتها غير المعقدة، ومقدرتها على الارتداد تجعلها مثيرة ومفيدة. معظم الكرات كروية الشكل، أي عندما لا يؤثر عليها أي قوة خارجية، فإنها تتخذ أشكال اتزان كروية. ولكن بعض الكرات، كالتي تستخدم في كرة القدم الأمريكية ولعبة الرغبي، لها أشكال اتزان ليست كروية بل مستطيلة.



شكل ١,٢,٣: عملية الارتداد من على حائط لها نصفان: (أ) التصادم و(ب) الارتداد. أثناء التصادم بين الكرة والحائط، يتحول بعض من طاقتها الحركية لأشكال أخرى – ويسمى هذا المقدار طاقة التصادم. أثناء الارتداد، يتحرر بعض من الطاقة المختزنة كطاقة حركية – ويسمى هذا المقدار طاقة الارتداد. طاقة الارتداد تكون دائماً أقل من طاقة التصادم لأن بعضاً من الطاقة يُفقد كطاقة حرارية. على أية حال، تهدر الكرة النشطة طاقة أقل من الكرة الميتة.

إن المصطلح «شكل متزن»، هو بالطبع أحد المصطلحات التي سبق أن استخدمناها: استخدمه القسم السابق لوصف الزنابك، وهذا ليس محض الصدفة، لأن الكرة الكروية الشكل تسلك نفس سلوك الزنبرك الكروي. في الحقيقة، جميع الأشياء المرتبطة بالزنبرك لها وجود في سلوك الكرات، على سبيل المثال، عندما تضغط سطح كرة للداخل، فإنها تبذل عليك قوة إرجاع للخارج. عندما تبذل شغلاً على الكرة أثناء تشويهك سطحها، فإنها تختزن بعضاً من هذا الشغل كطاقة كامنة مرنة، وعندما تدع الكرة تعود لشكلها المتزن، فإنها تطلق هذه الطاقة المختزنة.

يتضح هذا السلوك الزنبركي عندما تصطدم كرة بالأرضية أو بمضرب، يتشوه سطح الكرة أثناء الاصطدام، فيُعطى طاقة كامنة مرنة تُطلق عندما ترتد الكرة. إذا كانت الكرة تتحرك، فإن بعضاً من هذه الطاقة المختزنة تأتي من طاقتها الحركية. وإذا اصطدمت الكرة بسطح متحرك، يأتي بعض من هذه الطاقة المختزنة من طاقة السطح الحركية. يظهر معظم الطاقة المختزنة مرة أخرى كطاقة حركية في الكرة والسطح أثناء ارتدادها.

بعض الكرات ترتد أفضل من غيرها. كثيراً ما نسمي الكرات شديدة الارتداد «نشطة» والكرات التي لا ترتد بشكل جيد «ميتة». إحدى الطرق للنظر في حيوية الكرة هي بمقارنة الطاقات الحركية قبل وبعد الارتداد. نستطيع أن نفعل ذلك بتقسيم العملية لقسمين: التصادم والارتداد. (شكل ١,٢,٣). أثناء التصادم، فإن الكرة والسطح يحولان بعضاً من طاقتهما الحركية الكلية إلى طاقة كامنة مرنة وطاقة حرارية. يسمى مقدار الطاقة الحركية المحولة أثناء التصادم طاقة التصادم. تقوم الكرة النشطة بتحويل طاقة التصادم لطاقة كامنة مرنة بشكل جيد، بينما تحول الكرة الميتة معظم هذه الطاقة لطاقة حرارية (شكل ٢,٢,٣).
أثناء الارتداد، تدفع كل من الكرة والسطح بعضهما بعيدا عن الآخر، فتحوّلا الطاقة الكامنة المرنة وتعيدها لطاقة حركية. المقدار الكلي للطاقة الحركية التي تنشأ من دفع الكرة والسطح بعضهما بعيدا عن الآخر هي طاقة الارتداد. طاقة التصادم التي لا تظهر كطاقة ارتداد تكون قد تحولت لطاقة حرارية.



بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ٢,٢,٣: عندما تصطدم كرة تنس بالأرض، فإنها تنبعج للداخل لتخزن الطاقة ثم ترتد بسرعة أقل بعض الشيء من سرعتها قبل التصادم. هذه الصور توضح موقع الكرة في اثني عشر موقع يفصلها فترات زمنية متساوية. هل الكرة مرتدة لليسار أم اليمين؟ وكيف يمكنك معرفة ذلك؟

جدول ١,٢,٣ : نسب الطاقة التقريبية ومعاملات الارتداد لأنواع متعددة من الكرات

نوع الكرة	طاقة الارتداد/طاقة الاصطدام	معامل الارتداد
الكرة الفائقة	0.81	0.9
كرة الراكيت	0.72	0.85
كرة الغولف	0.67	0.82
كرة التنس	0.56	0.75
كرة المحمل الدحروجي الصلبة	0.42	0.65
كرة البيسبول	0.30	0.55
كرة مطاطية اسفنجية	0.09	0.30
كرة «غير سعيدة»	0.01	0.10
كيس الفول	0.002	0.04

إن نسبة طاقة الارتداد إلى طاقة التصادم (جدول ١,٢,٣) تحدد إلى أي ارتفاع سترتد الكرة عندما تسقطها من السكون على أرضية صلبة (شكل ٣,٢,٣). الكرة المرنة المثالية ستكون لها نسبة 1.00 وسترتد لنفس ارتفاعها الابتدائي. ولكن الكرة الحقيقية تهدر بعضاً من طاقة التصادم وترتد لارتفاع أقل. يتناسب الارتفاع الذي تسقط منه الكرة مع طاقة جذبها الكامنة الابتدائية، وبالتالي مع طاقة تصادمها. بالمثل، يتناسب الارتفاع الذي ترتد إليه مع طاقة الارتداد. النسبة بين هذين الارتفاعين هي بالتالي مؤشر جيد للنسبة بين طاقة الارتداد وطاقة التصادم. كلما قلّت هذه النسبة، قلت الطاقة الحركية التي تستلمها الكرة أثناء الارتداد وضَعُف الارتداد.

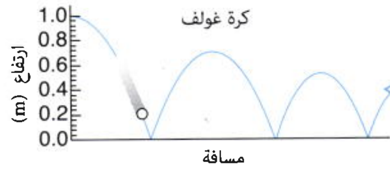
مع أن هذه النسبة بين الطاقات مفيدة في كثير من الأحيان، إلا أن الكرة تميَّز في العادة بمعامل الارتداد – النسبة بين سرعة الارتداد إلى سرعة التصادم عندما ترتد من على سطح صلب ساكن:

$$\text{معامل الارتداد} = \frac{\text{سرعة الارتداد}}{\text{سرعة الاصطدام}} \qquad (١,٢,٣)$$

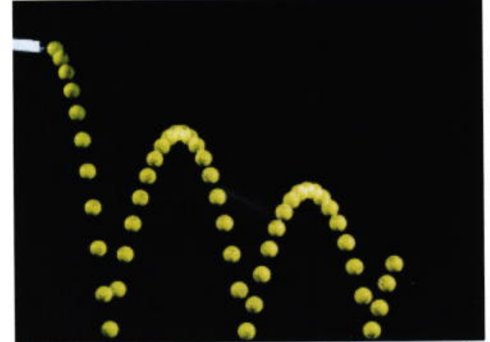
لقد وجد العلماء أن نسبة السرعة هذه لمعظم الكرات تظل ثابتة على مدى واسع من سرعات التصادم. الكرة التي ترتد بنفس السرعة التي كانت عليها عندما اصطدمت بالسطح يكون لها معامل ارتداد مقداره 1.00. الكرة الفائقة تكون تقريباً بهذه الحيوية، حيث معامل ارتدادها مقداره 0.90 تقريبا. لذا، فإنه عند اصطدام كرة فائقة تسير بسرعة 10km/s بحائط خرساني، فإنها ترتد تقريبا بسرعة 9km/s . على النقيض من ذلك، الكرة المطاطية الأسفنجية لها معامل ارتداد يساوي حوالي 0.3، بينما كيس الفول معامله تقريباً صفر.

في الواقع، هناك علاقة مباشرة بين معامل الارتداد والنسبة بين الطاقات. تذكر أن طاقة الكرة الحركية تساوي نصف كتلتها مضروبة في مربع سرعتها، أو $½\ m\ v^2$. حتى وإن كنا لا نعلم كتل الكرات، لكننا نعلم أن النسبة بين الطاقات تساوي مربع النسبة بين السرعات. وهكذا، إذا ارتدت كرة مطاطية أسفنجية بمقدار0.3 من سرعة تصادمها، فإنها تحتفظ بمقدار 0.32 – 0.09





سي ميلر/ صور نورث بوينت



شكل ٣,٢,٣: (أ) تهدر كرة البيسبول 70% من طاقة التصادم على شكل طاقة حرارية وترتد بشكل ضعيف. بالمقابل، تهدر كرة الغولف فقط 30% من طاقة التصادم فترتد بشكل جيد. (ب) الصورة التي على اليمين لكرة الغولف توضح ذلك عند تجميد الحركة.

أو ٩٪ فقط - من طاقتها الحركية الأصلية، ويتحول باقي المقدار 91٪ إلى طاقة حرارية في المطاط والهواء المكون للكرة. في المقابل، فإن الكرة الفائقة تحتفظ بحوالي 81٪ من مقدار طاقتها الحركية الأصلية بعد الارتداد.

ترتد الكرات بشكل أفضل عندما تختزن الطاقة من خلال الانضغاط بدلا من خلال انبعاج السطح. وذلك لأن معظم مواد تكوين الكرات، مثل الجلد أو البلاستيك الشبيه بالجلد، تواجه احتكاكاً داخلياً كبيراً مهدراً للطاقة أثناء الانبعاج. بما أن الكرات الصلبة تتضمن انضغاطاً، لذا فهي ترتد في الغالب بشكل جيد، بغض النظر عن كونها مصنوعة من المطاط أو الخشب أو البلاستيك أو المعدن. ولكن الكرات الممتلئة بالهواء ترتد بشكل أفضل فقط إذا كانت منتفخة بشكل جيد. كرة السلة المعتادة، التي تختزن معظم طاقتها في هوائها المضغوط، لها معامل ارتداد كبير. على النقيض من ذلك، كرة السلة غير المنتفخة بشكل جيد، والتي ينبعج سطحها بشكل كبير أثناء التصادم، بالكاد ترتد. وبالمثل، ترتد كرة التنس بشكل أفضل عندما تكون جديدة؛ بعد فترة من الزمن، يتسرب الهواء المضغوط داخلها للخارج وينخفض معامل ارتداد الكرة.

تحقق من فهمك # ١: لعبة الكرات الزجاجية الصغيرة (البـلية، البرجون)

(للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

حينما تتجه للمنتزه لتلعب لعبة البلية مع بعض أصدقائك، تسقط العديد من البليات الزجاجية من خلال ثقب في حافظة البليات وترتد بشكل جيد من على الرصيف الجرانيت. كيف يمكن للبلية أن ترتد؟

كيف يؤثر السطح على الارتداد

إذا لم يكن السطح الذي ترتد من عليه الكرة صلباً تماما، فإن هذا السطح سيساهم في عملية الارتداد. إنه سيتشوه ويخزن طاقته عندما تصطدم الكرة به ويعيد بعضاً من هذه الطاقة المختزنة للكرة المرتدة. إجمالا، يتشارك كل من الكرة والسطح في طاقة التصادم، حيث أن كليهما يسلكان مسلك الزنابك، وكلاهما يوفر بعضاً من طاقة الارتداد.

تعتمد كيفية توزيع طاقة التصادم بين السطح والكرة على مقدار صلابة كلٍّ منهما. أثناء الارتداد، يدفعان بعضهما بقوى متساوية في المقدار ولكن متعاكسة في الاتجاه. بما أن القوى التي تؤدي لانبعاجهما للداخل متساوية، فإن الشغل المبذول لتشويه كل جسم يتناسب مع مقدار الانبعاج للداخل. الجسم الذي ينبعج أكثر يستقبل معظم طاقة التصادم.

بما أن الكرة غالباً تتشوه أكثر من السطح الذي ترتطم به، فإنه من الطبيعي أن يذهب معظم طاقة التصادم للكرة. نتيجة لذلك، قد تعتقد أن الكرة توفر معظم طاقة الارتداد أيضا. ولكن ليس هذا صحيحا دائما. يختزن بعض الأسطح المرنة الحيوية طاقة تصادم بكفاءة عالية وتعيد تقريبا كل هذه الطاقة على شكل طاقة ارتداد. نظراً لأن الكرة الميتة نسبياً تهدر معظم طاقة التصادم التي تستقبلها، فإن مساهمة السطح الحيوي لطاقة الارتداد تكون مهمة جداً للارتداد. يعد المضرب الحيوي مهماً جداً للعبة التنس، لأن أوتار المضرب توفر معظم طاقة الارتداد عند ارتداد الكرة من على المضرب (شكل ٤،٢،٣). الترامبولين ولوحات القفز الزنبركية هما مثالان شديدا الأهمية، حيث أن أسطحهما حيوية جداً إلى درجة أنها تستطيع أن تجعل الأشخاص يرتدون. إن الأشخاص، مثل أكياس الفول، لهم معامل ارتداد صفري تقريباً؛ فعندما تهبط على الترامبولين، فإنه يستقبل ويخزن معظم طاقة التصادم ثم يوفر معظم طاقة الارتداد.

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ٤،٢،٣: عندما ترتد كرة تنس من على مضرب متحرك، فإن كلاً من الكرة والمضرب ينبعج للداخل. يتقاسم الكرة والمضرب طاقة التصادم بالتساوي تقريباً.

كما تحدد صلابة كل من الكرة والسطح مقدار القوة التي يبذلها كل جسم على الآخر وبالتالي سرعة مضي عملية التصادم. تقاوم الأجسام الصلبة الانبعاج بشدة أكثر من الأجسام المرنة. عندما يكون كلا الجسمين صلباً، فإن القوى المؤثرة كبيرة والتسارع سريع. لذا فإن الكرة الفولاذية ترتد بسرعة كبيرة من على أرضية خرسانية لأن كلاهما يبذل قوة هائلة على الآخر. إذا كانت الكرة و/أو السطح مرنين نسبيا، فإن القوى أضعف والتسارع أبطأ.

ماذا لو كان السطح الذي ترتطم به الكرة ليس كبيراً؟ في هذه الحالة، فإن السطح قد يقوم ببعض أو جميع «الارتداد». أثناء الارتداد، تتسارع الكرة والسطح في اتجاهين متعاكسين ويتشاركان في طاقة الارتداد. تتسارع الأسطح الكبيرة، مثل الأرضية أو الحائط، قليلاً وتكاد لا تستقبل أياً من طاقة الارتداد. ولكن عندما يكون السطح الذي ترتطم به الكرة ليس كبيرا، فقد تراه يتسارع. عندما ترتطم كرة بمصباح على الطاولة، فإن الكرة ستقوم بمعظم التسارع، ولكن من المحتمل أن يسقط المصباح أيضا.

وبالمثل، عندما تصطدم كرة البيسبول بمضرب البيسبول، فإن الكرة والمضرب يتسارعان باتجاهين متعاكسين. كلما كان المضرب أكبر حجما، قلّ تسارعه. لضمان أن معظم طاقة الارتداد ذهب لكرة البيسبول، فإن اللاعبين الأسطوريين في بداية القرن العشرين كانوا يستخدمون مضارب كبيرة. هذه المضارب لم تعد رائجة لصعوبة تلويحها. ولكن في الأيام الأولى للعبة البيسبول، عندما كان الرماة أقل مهارة، فإن المضارب الكبيرة استطاعت أن تعين اللاعبين لتحقيق الأهداف.

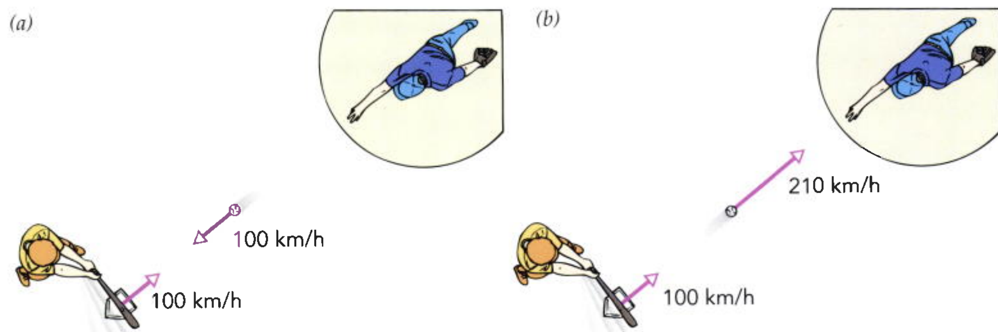
تحقق من فهمك # ٢: بداية اللعبة (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

أنت تلعب لعبة البلية في حقل ترابي أملس. الهدف هو أن تخرج البليات الزجاجية خارج دائرة عن طريق قذفها ببليات أخرى. بداية تقوم بإسقاط عدد من البليات على الأرض داخل الدائرة ولا تكاد ترتد. ما الذي يمنعهم من الارتداد بشكل جيد هنا؟

كيف يؤثر سطح متحرك على الارتداد

تصف الفقرة السابقة عملية ضرب كرة البيسبول بمضرب بيسبول متحرك كما لو أنها كانت حالة «ارتداد». قد يبدو ذلك غريبا بعض الشيء. عندما ترتطم كرة البيسبول بمضرب ساكن، فإن الكرة ترتد. ولكن إذا ضرب مضرب متحرك كرة ساكنة، هل من الصحة أن نقول أن الكرة ترتد؟

الجواب نعم. في الواقع، أي من الجسمين هو المتحرك وأيهما ساكن يعتمد على منظورك – أي إطارك المرجعي القصوري. ستدعي الذبابة الموجودة على كرة البيسبول أن الكرة ساكنة وأنها على وشك أن تُضرب بمضرب متحرك. ستدعي ذبابة أخرى موجودة



شكل ٥,٢,٣ (أ) قبل أن يتصادما، تقترب الكرة والمضرب من بعضهما بسرعة إجمالية مقدارها200km/h. (ب) بعد التصادم، يبتعدان عن بعضهما بسرعة مقدارها 110km/h. ولكن بما أن المضرب يتحرك باتجاه الرامي بسرعة مقدارها 100km/h، فإن الكرة المقذوفة تتحرك بسرعة 210km/h في نفس الاتجاه.

على مضرب البيسبول أن المضرب ساكن وأنه على وشك أن يُضرب بكرة بيسبول متحركة. فأي من الذبابتين لها الإطار المرجعي القصوري الصحيح؟
كما لاحظنا في قسم ١-١، كلا الإطارين المرجعيين صحيح على حد سواء. الإطار المرجعي القصوري هو الإطار الذي لا يتسارع وبالتالي فهو إما ساكن أو يتحرك بسرعة ثابتة. طالما تنظر للعالم من حولك من خلال إطار مرجعي قصوري، فإن قوانين الحركة ستصف بدقة ما تراه، وستكون الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية جميعها محفوظة.

ولكن الأطر المرجعية ليست أول ما يتبادر لذهنك أثناء لعبة البيسبول. عندما تلوح بالمضرب وتدفع الكرة المضروبة باتجاه مركز ساحة اللعب، فإن اهتمامك الرئيسي هو سرعة الكرة في حركتها باتجاه المدرج. فالكرة السريعة ستحقق هدفا، بينما الكرة البطيئة ستأتي بالفشل. ما الذي يحدد سرعة الكرة المضروبة؟

مع حركة كل من المضرب والكرة بالنسبة لساحة اللعب، فإن هناك العديد من الأطر المرجعية القصورية المفيدة، والتي منها نستطيع دراسة التصادم. ولكن سنجد أنه من الأسهل أن نركز على سرعة المضرب والكرة عند اقترابهما أو ابتعادهما عن بعض. هذه الحركة النسبية هي الأكثر أهمية في التصادم. ففي نهاية الأمر، إذا ارتطمت صخرة بقنينة أو ارتطمت قنينة بصخرة، فإنه سيكون سيئاً للقنينة.

عندما ترتد كرة من على سطح متحرك وصلب وكبير، لا يزال ينطبق معامل ارتداد الكرة في هذه الحالة. ولكن علينا الآن استخدام صيغة أكثر عمومية للنسبة بين السرعات. هذه الصيغة المطورة تقسم السرعة التي يتباعد بها السطح والكرة بعد الارتداد على سرعة تقاربهما قبل الارتداد:

$$\text{معامل الارتداد} = \frac{\text{سرعة التباعد}}{\text{سرعة التقارب}} \qquad (٢,٣,٣)$$

عندما يكون السطح ساكنا، تكون المعادلة (٢,٣,٣) مكافئة للمعادلة (١,٣,٣).

لرؤية كيف يسمح لنا هذا التعميم بتفسير لماذا تتحرك كرة البيسبول الآن التي قمت بضربها من فوق رأس لاعب مركز الساحة، دعنا نفحص عملية التصادم بين المضرب والكرة. لنفترض أنه قبل التصادم مباشرة (شكل ٥,٢,٣ أ)، كانت كرة البيسبول المقذوفة تقترب من قاعدة البداية بسرعة 100km/h (62mph) وأنه أيضا أثناء تلويحك بالمضرب لضرب الكرة، كان مضربك يتحرك بسرعة 100km/h باتجاه الرامي. بما أن كلا الجسمين يتحرك باتجاه الآخر، فإن سرعة تقاربهما هي مجموع سرعتيهما الفردية، أو 200km/h (124mph).
معامل ارتداد كرة البيسبول هو 0.55، فبعد التصادم (شكل ٥,٢,٣ ب) ستكون سرعة التباعد فقط 0.55 من سرعة التقارب، أو 110km/h. تتباعد الكرة المقذوفة والمضرب عن بعضهما بسرعة 110km/h. بما أن المضرب مازال يتحرك باتجاه الرامي بسرعة 100km/h، فإن الكرة لابد أن تكون متحركة باتجاه الرامي بسرعة أكبر: بسرعة100km/h إضافة لسرعة 110km/h أو إجمالا بسرعة 210km/h (130mph)! لذلك فهي تطير متخطية الجميع باتجاه المدرجات.

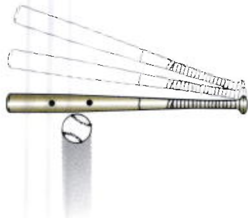
تحقق من فهمك # ٣: أطر مرجعية البلية

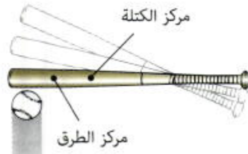
(للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

ينقر اثنان منكم بليته إلى داخل الدائرة بشكل آني من اتجاهين متعاكسين فتتصادمان رأسيا. كل من البليتين كانت تتحرك للأمام بسرعة 1m/s (3.3ft/s). من الإطار المرجعي القصوري لبليتك، ماذا كانت سرعة البلية الأخرى قبل ارتطام البليتين مباشرة؟

الأسطح أيضا ترتد .. وتلتف وتنحني

كما ترى، فإن حركة السطح لها تأثير كبير على الكرة التي ترتد من عليه. السطح الذي يتحرك باتجاه الكرة المتحركة نحوه سيقوي الارتداد، بينما السطح الذي يتحرك بعيدا عن الكرة سيضعفه. ولكننا نهمل تأثير الكرة على السطح نفسه. أحيانا يرتد ذلك السطح أيضا.
مضرب كرة البيسبول هو الحالة التي سننظر فيها. عندما تلوّح بمضربك لضرب كرة مقذوفة، فإن المضرب لا يستمر في الحركة بالضبط كما كان من قبل. تدفع الكرة المضرب أثناء التصادم فيستجيب المضرب بطرق عديدة مثيرة.


(أ)



(ب)


(ج)

شكل ٦،٢،٣: عندما تضرب كرة مضرباً، فإن المضرب يواجه كلاً من تسارع خطي وتسارع زاوي. (أ) إذا ضربت الكرة المضرب بالقرب من مركزه، فإن التسارع الزاوي يكون صغيراً ويتسارع مقبض المضرب للخلف. (ب) إذا ضربت الكرة المضرب بالقرب من طرفه، فإن التسارع الزاوي يكون كبيراً ويتسارع مقبض المضرب للأمام. (ج) ولكن إذا ضربت الكرة المضرب في مركز طرقه، فإن التسارع الزاوي يكون مناسباً جدا لمنع المقبض من التسارع.

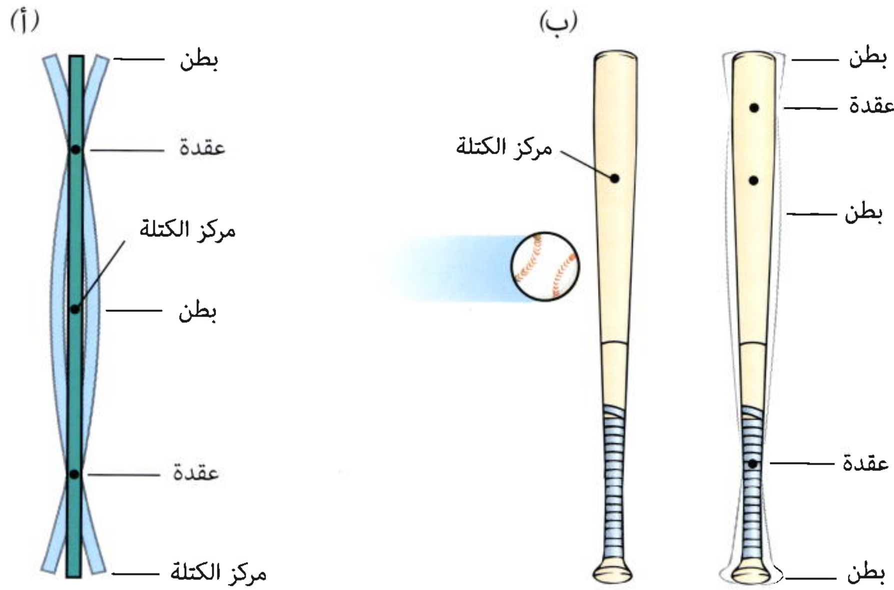
أولا: وكما لاحظنا سابقا، يرتد المضرب من على الكرة. يتباطأ المضرب بعض الشيء أثناء التصادم بحيث تكون سرعته بعد التصادم أقل قليلا من قبله. بما أن سرعة الكرة النهائية تعتمد على سرعة المضرب النهائية، فالمضرب الأبطأ يعني كرة أبطأ. لذا فقد زدنا في تقدير سرعة الكرة أثناء توجهها نحو المدرجات.
ثانيا: تصادم الكرة يجعل المضرب يدور حول نفسه. عندما تدفع الكرة المضرب وتجعله يتسارع للخلف، فإنها تبذل أيضا عزم دوران على المضرب حول مركز كتلته وتجعله يخضع لتسارع زاوي (شكل ٦،٢،٣). مع أن هذين التسارعين قد يبدوان غير مهمين، لكن يديك تشعر بتأثيرهما. فتسارع المضرب يميل لنتر مقبضه باتجاه ماسك الكرة، بينما يميل تسارعه الزاوي للف مقبضه باتجاه الرامي. يعتمد مدى هاتين الحركتين على الموضع الذي تصيب فيه الكرة المضرب. إذا ضربت الكرة نقطة تسمى مركز الطرق، فإن المقبض لا يواجه أي تسارع إجمالي (شكل ٦،٢،٣ ج). يفسر الشعور الرقيق لهذا التصادم لماذا يسمى مركز الطرق، والذي يقع حوالي ٧ بوصات من نهاية المضرب، بـ«البقعة الحلوة».

أخيراً، كثيراً ما يؤدي التصادم لتذبذب المضرب، مثل لوحة الزيلفون المضروبة بمطرقة (شكل ٧،٢،٣ أ)، فإن المضرب ينحني للأمام والخلف بسرعة بحيث يتحرك طرفاه ومركزه في اتجاهين متعاكسين (شكل ٧،٢،٣ ب). هذه الاهتزازات تلسع يديك ويمكنها حتى كسر مضرب خشبي. ولكن، بقرب طرفي المضرب توجد نقطة لا تتحرك عند اهتزاز المضرب – عقدة اهتزازية. عندما تضرب الكرة المضرب عند عقدته لا يحدث أي اهتزاز. بل يصدر المضرب صوت اصطدام واضحاً وحاداً وتتحرك الكرة لمسافة أبعد. من حسن الحظ أن عقدة المضرب الاهتزازية ومركز طرقه تتطابقان تقريبا، فيمكنك أن تضرب الكرة في البقعتين الحلوتين في الوقت ذاته.

كما توضح حركات وانحناءات المقبض هذه، فإن علم وهندسة المضارب معقدة بشكل مدهش. لذلك فإن صانعي المضارب يطورونها بشكل مستمر لتكون أفضل وأكثر فعالية. مثل صانعي مضارب الغولف، ومضارب التنس، وأدوات البولنج وطاولات البلياردو، فإنهم يحلمون بارتدادات مثالية بحيث يخزن جميع طاقة التصادم ويعاد كطاقة ارتداد. هذه الارتدادات المثالية تسمى تصادمات مرنة وهي شائعة بين ذرات الغازات الصغيرة جدا، ولكن مستحيل إدراكها في الأجسام الاعتيادية؛ حيث أن هناك الكثير من الطرق التي يمكن لأي مادة كبيرة أن تحوّل أو تبدد الطاقة، بما في ذلك كطاقة حرارية، أو صوت، أو اهتزاز، أو ضوء.

بالرغم من أن منتجي الأدوات يجب أن يرضوا بالتصادمات غير المرنة – التصادمات التي تخفق في إعادة بعض من طاقة التصادم كطاقة ارتداد – إلا أنهم يقتربون سنويا من الكمال. وهم أيضا يدفعون لأقصى الحدود القانونية، وأحيانا لأبعد من ذلك، في مسعاهم نحو الأداء الأكمل.

المضارب المتعددة الطبقات المصنوعة من الألمنيوم والتيتانيوم والمركبات المختلفة جميعها أمثلة جيدة. كل من هذه المضارب المجوفة رقيق بما يكفي لإحداث انبعاج كبير فيه لحد ما أثناء تصادمه مع الكرة فيستقبل معظم طاقة التصادم. فيتسطح برميله الدائري (الجزء الأكثر انتفاخا في المضرب) ليأخذ شكلا بيضاويا، فيخزن طاقة التصادم بشكل جميل، ثم يعود للشكل الدائري عبر زمن مطابق لزمن الارتداد نفسه.

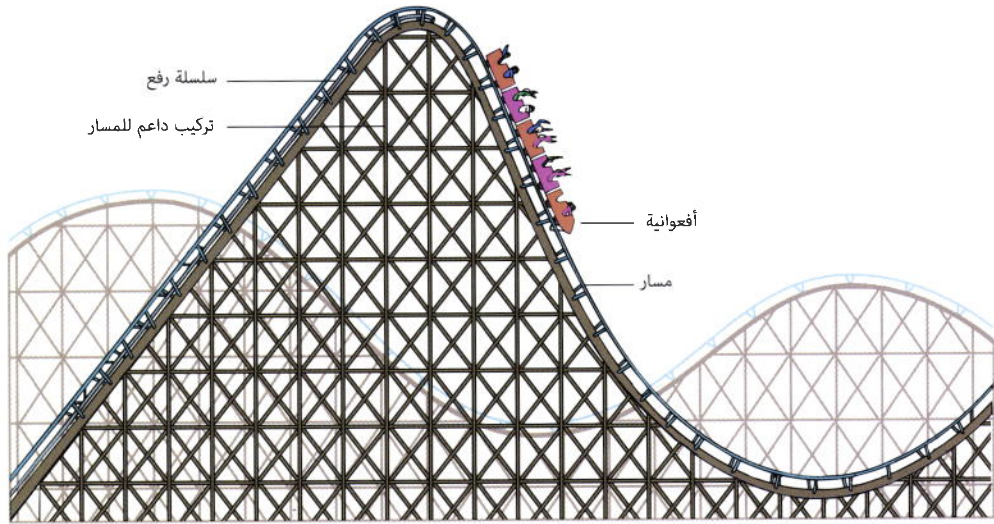


شكل ٧،٢،٣ (أ): عند طرق لوح الزيلفون بمطرقته فإن اللوح يتذبذب بحيث يتحرك منتصفه وطرفاه للأمام والخلف في اتجاهين متعاكسين. الأجزاء التي تتحرك أبعد ما يمكن تسمى بطناً، بينما النقاط التي لا تتحرك على الإطلاق تسمى عقداً، (ب) عند الاصطدام بالكرة، فإن مضرب البيسبول يتذبذب بطريقة مماثلة. ولكن التصادم عند أحد عقد المضرب لا يحدث أي تذبذب.

على خلاف السطح الصلب للمضرب الخشبي، والذي بالكاد ينبعج وبالكاد يساهم في عملية تخزين الطاقة، فإن هذه المضارب ذات التقنية العالية تعمل كالترامبولين - تخزن وتعيد الكثير من طاقة التصادم بحيث تزيد بشكل كبير سرعة الكرة المضروبة. يمكنك أن تجد مثل هذه الأدوات ذات التقنية العالية في متجر الغولف أو التنس. نحن في عصر يغير فيه التحليل والتصميم العلمي الألعاب الرياضية بشكل جذري.

تحقق من فهمك # ٤: الكتلة والبليات (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

البليات التي تلعب بها ليست جميعها نفس الحجم والكتلة. تلاحظ أن البليات الأكبر أكثر فعالية في قرع البليات الأخرى خارج الدائرة. قررت استخدام بلية كروية من الزجاج لها قطر مقداره 10cm، وتوقعت أن تُخلي الدائرة من جميع البليات. ولكن عندما نقرتها بإبهامك، فإن إبهامك ارتد فحسب. لماذا لا تتحرك الكرة الزجاجية للأمام بسرعة؟



٣-٣ دوامات الملاهي والأفعوانيات

عندما تقفز سيارتك الرياضية إلى الأمام عند إضاءة الإشارة باللون الأخضر، تُضغط للخلف على مقعدك بقوة. كأن الجاذبية تسحبك للأسفل والخلف في نفس الوقت بطريقة ما. ولكن الجاذبية ليست هي ما يجذبك للخلف؛ إنه قصورك الذاتي الذي يمنعك من التسارع إلى الأمام مع السيارة.

عندما يحدث هذا، فأنت تواجه الشعور بالتسارع. نحن نصادف هذا الشعور عدة مرات كل يوم، سواء كان ذلك خلال انعطاف السيارة أو صعود عدة طوابق في مصعد سريع. ولكن لا يوجد أي مكان يكون فيه الشعور بالتسارع أشد من مدينة الملاهي، نحن نتسارع للأعلى، وللأسفل، وحول في دوامة الملاهي، وإلى الأمام والخلف في سيارات التصادم، ولليمين واليسار في القلّابة *scrambler* . قمة الألعاب، بالطبع هي الأفعوانية، والتي هي إحساس عظيم وجامح بالتسارع. عندما تغمض عينيك وأنت في طريق سريع طويل وممتد، فأنت بالكاد تستطيع أن تشعر بأن السيارة تتحرك. ولكن عندما تغمض عينيك أثناء ركوبك أفعوانية، فأنت لا تواجه مشكلة في الشعور بكل انحناءة في مسارها. ليست السرعة هي التي تشعر بها، ولكنه التسارع. ما يسمى في العادة دوار الحركة في الحقيقة يجب أن يسمى دوار التسارع.

أسئلة للتفكير

كيف يشعر جسمك بوزنه؟ عندما تأرجح دلواً مملوءاً بالماء في دائرة، مثل ما طلبنا منك أن تقوم به في فاتحة الفصل، لماذا يجذبك الدلو للخارج؟ لماذا تستطيع أن تأرجح الدلو فوق رأسك تماماً دون سكب الماء الذي بداخله؟ ما الذي يمنعك من السقوط خارج مقطورة الأفعوانية عندما تصل لقمة حلقة رأسية؟ في أي مقطورة في الأفعوانية يجب أن تجلس لتستمتع بأفضل جولة؟

تجارب يمكن القيام بها

لكي تبدأ بربط أحاسيس الحركة المألوفة بفيزياء التسارع، سافر كراكب في مركبة تقوم بالعديد من الانعطافات والتوقفات. أغمض عينيك وانظر إذا كان بإمكانك أن تقرر في أي اتجاه تنعطف المركبة ومتى تبدأ أو تتوقف؟ في أي اتجاه شعرت بالجذب عندما انعطفت المركبة إلى اليسار؟ وعند الانعطاف إلى اليمين؟ عند البدء؟ وعند التوقف؟ كيف يرتبط هذا الشعور باتجاه تسارع المركبة؟ والآن ابحث عن وقت تتحرك فيه المركبة بسرعة ثابتة في طريق مستوٍ وانظر إذا كان بإمكانك أن تجد أي شعور يخبرك عن الاتجاه الذي تتجه فيه المركبة. حاول أن تقنع نفسك بأن المركبة تتجه للخلف أو للجانب بدلاً من الأمام. أيهما أسهل أن تشعر به: تسارعك أم سرعتك؟

خوض تجربة التسارع

لا شيء أكثر مركزية لقوانين الحركة من العلاقة بين القوة والتسارع. إلى الآن، درسنا القوى ولاحظنا أنه يمكنها إحداث تسارع؛ في هذا القسم سننظر من المنظور المعاكس، أي دراسة التسارع وملاحظة أنه يتطلب قوى. حتى تتسارع، لابد أن يسحبك أو يدفعك شيء. معرفة أين وكيف تؤثر هذه القوة عليك تحدد الشعور الذي ستشعر به عندما تتسارع.

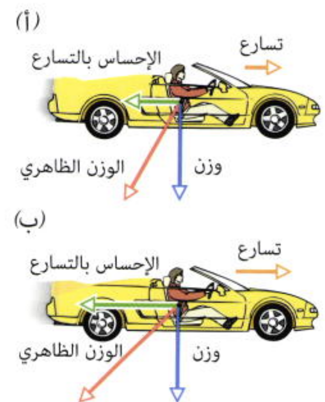


شكل ١،٣،٣: عندما تتسارع للأمام في سيارة، تشعر بإحساس شبيه بتسارع الجاذبية في الاتجاه المعاكس للتسارع. هذا الشعور بالتسارع هو في الحقيقة مقاومة كتلة جسمك للتسارع.

الشعور بالدفع للخلف الذي تشعر به عندما تتسارع سيارتك للأمام سببه قصور جسمك الذاتي، أي ميل جسمك لعدم التسارع (شكل ١،٣،٣). تتسارع السيارة ومقعدك للأمام، وبما أن المقعد يعمل على منعك من التحرك خلال سطحه، فإنه يبذل قوة داعمة للأمام عليك تجعلك تتسارع للأمام، ولكن المقعد لا يستطيع أن يبذل قوة منتظمة على جميع جسمك. بل يدفع فقط على ظهرك، ثم يدفع ظهرك عظامك، وأنسجة جسمك، وأعضاءك الداخلية لجعلهم يتسارعون للأمام، كل قطعة نسيج أو عظم مسؤولة عن بذل قوة للأمام على النسيج الذي أمامها لتسارعه للأمام. إن سلسلة طويلة من القوى، ابتداء من ظهرك واستمراراً للأمام وصولا لصدرك، تسبب في جعل جميع جسمك يتسارع للأمام.

دعنا نقارن هذه الحالة مع الذي يحدث عندما تقف بلا حراك على الأرضية. بما أن الجاذبية تبذل عليك قوة للأسفل موزعة بانتظام على جميع جسمك، فكل جزء من جسمك له وزنه الخاص به؛ هذه الأوزان الخاصة، إذا أُخذت سوية، تتجمع لتعطي وزنك الكلي. والأرضية من جهتها تبذل عليك قوة داعمة للأعلى لمنعك من التسارع للأسفل خلال سطحها. ولكن الأرضية لا تستطيع أن تبذل قوة منتظمة على جميع جسمك، بدلا من ذلك، تدفع قدميك فقط، وقدماك عندما تدفع عظامك وأنسجتك وأعضاءك الداخلية لمنعها من التسارع للأسفل. كل قطعة نسيج أو عظم مسؤولة عن بذل قوة للأعلى والتي هي مطلوبة لمنع النسيج الذي يعلوها من التسارع للأسفل. إن سلسلة طويلة من القوى، ابتداء من قدميك واستمراراً للأعلى وصولا لرأسك، هي التي تمنع جميع جسمك من التسارع للأسفل.

من المحتمل أنك لاحظت أن الفقرتين السابقتين متماثلة جدا، ولكن كذلك الإحساس بالجاذبية والتسارع. عندما تمنعك الأرض من السقوط فأنت تشعر أنك «ثقيل»؛ يشعر جسمك بكل القوى الداخلية المطلوبة لدعم أجزائه حتى لا تتسارع، وأنت تترجم هذا الشعور كوزن. عندما يتسبب مقعد السيارة في تسارعك للأمام، فأنت أيضاً تشعر بأنك «ثقيل»؛ فيشعر جسمك بكل القوى الداخلية المطلوبة لتسارع أجزائه للأمام، وأنت تترجم هذا الشعور كوزن. في هذه الحالة تشعر بإحساس مثيل للوزن نحو مؤخرة السيارة.



شكل ٢،٣،٣ (أ): عندما تتسارع للأمام بلطف، فإن الإحساس بالتسارع للخلف يكون صغيراً ومعظم وزنك الظاهري يكون للأسفل. (ب) عندما تتسارع للأمام بسرعة، فأنت تواجه إحساساً قوياً بالتسارع للخلف ووزنك الظاهري يكون للخلف وللأسفل.

حاول كما تشاء، ولكنك لن تستطيع التمييز بين الشعور بمثيل الوزن الذي تواجهه عندما تتسارع وبين قوة الجاذبية الحقيقية. ولستَ الوحيد الذي يُخدع بالتسارع. حتى آلات المختبرات الأكثر تطورا لا تستطيع أن تحدد مباشرة ما إذا كانت تواجه جاذبية أم أنها متسارعة. ولكن، على الرغم من هذه الأحاسيس المقنعة، فإن الشعور بالثقل باتجاه الخلف والذي تشعر به في داخلك عندما تتسارع للأمام هو نتيجة القصور الذاتي وليس نتيجة قوة حقيقية باتجاه الخلف. سوف نسمي هذا الشعور الإحساس بالتسارع. يتجه هذا الإحساس دائماً في اتجاه معاكس للتسارع الذي يحدثه، وتتناسب شدته مع ذلك التسارع.

إذا تسارعت للأمام بسرعة، فإن الإحساس بالتسارع للخلف الذي تواجهه قد يكون كبيراً جدا. لكنك لن تواجه هذا الإحساس بالتسارع وحده؛ فأنت أيضاً تواجه وزنك للأسفل، وهذان التأثيران سوية يؤديان للشعور بوزن قوي جداً متجه بزاوية هي بين الأسفل رأسياً ومؤخرة السيارة. سنسمي هذا التأثير المركب للوزن والإحساس بالتسارع وزنك الظاهري. كلما زاد تسارعك زادت شدة إحساسك بالتسارع للخلف وزاد انحراف وزنك

الظاهري باتجاه مؤخرة السيارة (شكل ٢,٣,٣).

ليس من الضروري أن يتجه الإحساس بالتسارع للخلف. يمكن أن يشير للأمام أو حتى للجانب. عندما تدير سيارتك لليسار، فأنت تتسارع لليسار وتواجه إحساساً قوياً بالتسارع لليمين. عندما لا تكون أنت سائق السيارة ويمكنك إغماض عينيك بأمان، فسيكون بمقدورك أن تشعر بالتسارع في أي اتجاه.

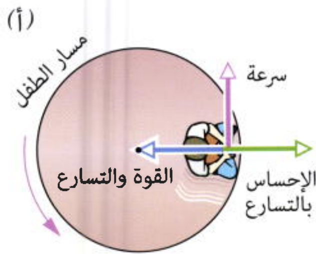
تحقق من فهمك # ١: الشعور بالانعطاف الحاد (الإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

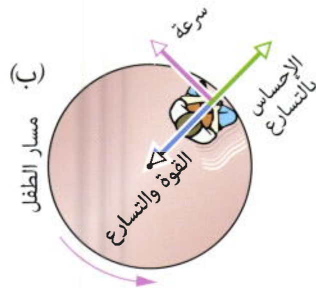
أنت تجلس في مقعد الراكب في سيارة سباق تتحرك بسرعة على طول مسار مستو. ينعطف المسار بشدة نـحو اليسار وتجد نفسك قد ارتميت نـحو الباب الذي على يمينك. ما هي القوى الأفقية التي تؤثر عليك وأي إحساس بالتسارع تواجهه؟

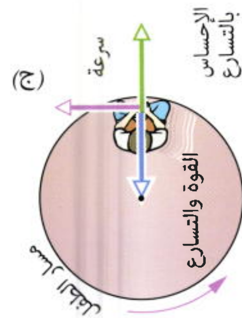
دوّامات الملاهي

عندما تركب في دوامة الملاهي، فأنت تتحرك في مسار دائري حول نقطة مركزية. هذه حركة غير عادية. إذا كنت تواجه محصلة قوة صفرية، فستتحرك في خط مستقيم بسرعة ثابتة وفقاً لقانون نيوتن الأول. ولكن بما أن مسارك دائري بدلا من مستقيم، فلابد أنك تواجه محصلة قوة غير صفرية وأنك تتسارع.

في أي اتجاه تتسارع؟ من اللافت للنظر أنك تتسارع دائما باتجاه مركز الدائرة. لرؤية سبب ذلك، دعنا ننظر من الأعلى لدوّامة ملاهي بسيطة تدور بعكس اتجاه عقارب الساعة بسرعة ثابتة (شكل ٣,٣,٣).







شكل ٣,٣,٣: **يتسارع** طفل راكباً دوّامة متحركة باتجاه نقطة الارتكاز المركزية باستمرار. يوضح متجه سرعته أنه يسير في دائرة ولكن **متجه** تسارعه يشير لنقطة الارتكاز المركزية. عندما يتحرك باتجاه الشمال (أ)، فهو **يتسارع** باتجاه الغرب. تتغير سرعته تدريجيا إلى أن يتجه باتجاه الشمال الغربي (ب)، حيث أن تسارعه الآن باتجاه الجنوب الغربي. يستمر الطفل في الدوران إلى أن يتجه للغرب (ج) وعندها يكون تسارعه باتجاه **الجنوب**. (يشير الشمال للأعلى.)

في بداية الأمر، يكون الطفل الراكب في الدوامة شرق نقطة الارتكاز المركزية مباشرة ويتحرك باتجاه الشمال (شكل ٣,٣,٣ أ). إذا لم يجذب الطفل أي شيء، فإنه سيستمر باتجاه الشمال ويُقذف من الدوّامة. بدلا من ذلك، يتبع مساراً دائرياً عن طريق التسارع باتجاه نقطة الارتكاز، أي باتجاه الغرب. نتيجة لذلك، تنحرف سرعته باتجاه الشمال الغربي ويتحرك في ذلك الاتجاه. لكي لا يُقذف من الدوّامة، يجب على الطفل أن يستمر في التسارع باتجاه نقطة الارتكاز، والتي هي الآن في الاتجاه الجنوب الغربي منه (شكل ٣,٣,٣ ب). تنحرف سرعته باتجاه الغرب، ويتبع المسار الدائري بهذا الاتجاه. وهكذا ستستمر (شكل ٣,٣,٣ ج).

يحاول جسم الطفل باستمرار أن يظل متحركاً في خط مستقيم، ولكن الدوامة تستمر في جذبه للداخل بحيث يتسارع باتجاه نقطة الارتكاز المركزية. يواجه الطفل حركة دائرية منتظمة. كلمة «منتظمة» تعني أن الطفل يتحرك دائما بنفس السرعة، على الرغم من أن اتجاه حركته يتغير باستمرار، كلمة «دائرية» تصف المنحنى الذي يتبعه الطفل أثناء حركته، أي مساره.

مثل أي جسم خاضع لحركة دائرية منتظمة، فإن الطفل يتسارع دائما باتجاه مركز الدائرة. هذا النوع من التسارع، أي الذي باتجاه مركز الدائرة، يسمى التسارع المركزي ويسببه قوة متجهة للمركز، أي قوة الجذب المركزي. القوة المركزية ليست نوعاً جديداً أو مستقلاً من أنواع القوة مثل الجاذبية، بل هي محصلة القوى المؤثرة على الجسم. كلمة المركزية تعني «ينشد المركز» والقوة المركزية تدفع الجسم باتجاه المركز. تستخدم الدوّامة قوى داعمة والاحتكاك لبذل قوة مركزية على الطفل، فيواجه تسارعاً مركزياً. كثيراً ما تتضمن ألعاب مدينة الملاهي تسارعاً مركزياً (شكل ٤,٣,٣).

يعتمد مقدار التسارع الذي يواجهه الطفل على سرعته ونصف قطر الدوّامة. كلما زادت سرعة حركة الطفل وكلما صغر نصف قطر مساره الدائري، زاد تسارعه. وتسارعه يساوي مربع سرعته مقسوماً على نصف قطر مساره.

ولكن يمكننا أيضاً تحديد تسارع الطفل من سرعة الدوّامة الزاوية ونصف قطرها. كلما زادت سرعة دوران الدوامة وكبر نصف قطر المسار الدائري للطفل، زاد تسارعه. تسارعه يساوي مربع سرعة الدوامة الزاوي مضروبا بنصف قطر مساره. يمكننا التعبير عن هاتين العلاقتين بالمعادلة اللفظية:

التسارع = السرعة ٢ / نصف القطر = السرعة الزاوية ٢ × نصف القطر (١،٣،٣)

ورمزيا: $a = v^2/r = w^2 \cdot r$

وبلغة الحياة اليومية: القيام بانعطاف حاد بسرعة عالية يتضمن قدراً كبيراً من التسارع.

بما أن الطفل يتسارع للداخل، أي باتجاه مركز الدائرة، فإنه يواجه إحساساً بالتسارع للخارج، أي بعيدا عن مركز الدائرة. يشعر الطفل كأن وزنه يجذبه للخارج بالإضافة للأسفل فيمسك بالدوّامة بإحكام لكي يتجنب السقوط منها.

يمكن أن يختلف الوزن عن الإحساس بالتسارع في الشدة بشكل كبير. ففي حين أن وزنك هو قوة الجاذبية المحددة التي تشعر بها بالقرب من سطح الأرض، يمكنك أن تواجه إحساساً بالتسارع له أي اتجاه وشدة. إذا كنت تتحرك بسرعة كبيرة حول دائرة صغيرة، فيمكنك بسهولة أن تواجه إحساساً بالتسارع أقوى من وزنك.

يمكن قياس إحساسك بالتسارع بالنسبة لوزنك. عندما يتساوى إحساسك بالتسارع مع وزنك، يقال أنه 1 وحدة من الجاذبية أو 1g كاختصار. لتواجه إحساساً بالتسارع مقداره 1g، يجب أن تتسارع في الاتجاه المعاكس بمقدار $9.8 m/s^2$ ($32 ft/s^2$)، وهو التسارع بسبب الجاذبية. إذا تسارعت 5 مرات هذا المقدار، وأنت تركب القلّابة scrambler أو في طائرة تقوم بمناورة حادة، فستواجه إحساساً بالتسارع مقداره 5g.

ستوارت دي/بنك الصور/صور جيتي



شكل ٤،٣،٣: الأشخاص الذين يركبون هذه اللعبة يسيرون في دائرة، ويُجذبون للداخل بواسطة حبال، بحيث يتسارعون نحو مركز الدائرة.

تحقق من فهمك # ٢: الانـحدار مع الانعطاف

(للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

تصل سيارة سباقك إلى منعطف منحدر نـحو اليسار، فتجتازه سيارتك بسهولة. لماذا من الضروري أن تكون انعطافات حلبة السباق ذات انـحدار بحيث أنها تميل للأسفل باتجاه مركز الانعطاف؟

دقق في أرقامك # ١: الذهاب في جولة لعب

(للإجابة، انظر صفحة ١٠٤)

يركب بعض الأطفال في ساحة اللعب دوّامة نصف قطرها 1.5m (4.9ft). تدور الدوّامة مرة كل ثانيتين. ما مقدار تسارع هؤلاء الأطفال؟

تسارع الأفعوانية

مع أن الأفعوانيات توفر تأثيرات بصرية مثيرة، مثل تجاوز العقبات بالكاد، والاتجاهات الغريبة، كالانقلاب رأسا على عقب، إلا أن الإثارة الحقيقية للأفعوانيات تأتي من تسارعها. العديد من ألعاب مدينة الملاهي الأخرى تعلقك جانبياً أو رأساً على عقب، فتشعر بالجاذبية الأرضية المعتادة تجذبك بزوايا غير اعتيادية. ولكن لماذا تدفع المال لركوب هذه الألعاب في حين يمكنك أن ترتكز على رأسك مجانا؟ لإثارة حقيقية، تحتاج إلى تسارع ليعطيك الشعور بانعدام الوزن والذي تشعر به عندما تهبط الأفعوانية من أول مرتفعاتها أو عندما تشعر إحساساً بالتسارع مقداره عدة جرامات وأنت تمر بمنعطف حاد. إن التغير في مقدار «الجاذبية» التي تشعر بها أكثر إثارة من التغير في اتجاهها. نـحن الآن مستعدون لدراسة أفعوانية وفهم ما تشعر به وأنت تتخطى مرتفعات (شكل ٥,٣,٣) وتدور في حلقات (شكل ٦,٣,٣).

في كل مرة تتسارع فيها الأفعوانية، تواجه إحساساً بالتسارع في اتجاه معاكس لتسارعك. هذا الإحساس بالتسارع يمنحك وزناً ظاهرياً مختلفاً عن وزنك الحقيقي. كما رأينا في السيارة، فإن التسارع بسرعة نـحو الأمام يجعل وزنك الظاهري يميل للخلف باتجاه مؤخرة السيارة، بينما التباطؤ السريع يجعله يميل باتجاه الأمام. لكن الأفعوانية يمكنها أن تقوم بشيء لا تستطيع السيارة القيام به: يمكنها أن تتسارع للأسفل بسرعة! في تلك الحالة، يكون الإحساس بالتسارع الذي تواجهه باتجاه الأعلى ويعاكس وزنك للأسفل بحيث يلغيان بعضهما جزئيا. نتيجة لذلك، يكون وزنك الظاهري أقل من وزنك الحقيقي ويتجه للأسفل، أو ربما للأعلى إذا كان التسارع للأسفل سريعاً بما فيه الكفاية.

تأمل ذلك الاحتمال الأخير: إذا تسارعت للأسفل بالمعدل الصحيح، فإن الإحساس بالتسارع للأعلى سيلغي وزنك للأسفل بالضبط، وستشعر بانعدام الوزن تماما، كما لو أن الجاذبية ليس لها وجود بتاتاً. معدل التسارع للأسفل الذي يسبب ذلك الإلغاء التام هو نفسه تسارع جسم يسقط سقوطاً حراً. إن وزنك لن يكون قد تغير، ولكن الأفعوانية لن تستمر في دعمك وستتسارع للأسفل بمقدار $9.8 m/s^2$ ($32 ft/s^2$)، وسوف تشعر بنفس إحساس الغوّاص الذي خطا لتوه مغادراً لوحة الغطس العالية.

بما أن الأجسام الساقطة سقوطاً حراً تكون تحت تأثير قوة الجاذبية فقط، فليس من الضروري أن يدفع بعضهم البعض للإبقاء على مواقعهم النسبية. حينما تسقط، ستسقط قبعتك ونظاراتك معك ولن يحتاجوا أي قوة داعمة من رأسك. حتى لو خُلعت نظاراتك، فستحوم أمامك أثناء ما يتسارع كلاكما للأسفل سوية. وبالمثل، لا تحتاج أعضاؤك الداخلية أن يدعم بعضها البعض، وغياب قوى الدعم

شـكل ٥,٣,٣: حينـما تهبط هـذه الأفعوانية من مرتفعهـا الأول، تُجذب مقطورتها الأخيرة من على الحافة بواسـطة المقطورات التي أمامها ويشعر راكبوها بانعدام الوزن تقريباً.



هاري ديوريو/ الإيميج وركس



بوب توريز/ستون/صور جيتي

شكل ٦،٣،٣: حينما تقوم هذه الأفعوانية بالدوران في حلقة فإنها تتسارع بسرعة باتجاه مركز الدائرة. عندما تصل قمة الحلقة، يدفعها المسار للأسفل فيشعر الركاب أنهم مضغوطون على مقاعدهم. إذا أغمضوا أعينهم فإنهم لن يستطيعوا حتى أن يميزوا إن كانوا مقلوبين رأساً على عقب أم لا.

الداخلية يسبب الإحساس المنعش بالسقوط الحر.

ولكن الأفعوانية ترتبط بمسار، ويمكن لمعدل تسارعها للأسفل أن يتجاوز في الواقع تسارع جسم ساقط سقوطاً حراً. في تلك الحالات الخاصة، سيساعد المسار الجاذبية في دفع الأفعوانية للأسفل. كراكب، ستشعر بأقل من انعدام الوزن، وسيكون الإحساس بالتسارع للأعلى كبيراً جداً بحيث أن وزنك الظاهري سيتجه للأعلى، كما لو أن العالم انقلب رأساً على عقب!

تحقق من فهمك # ٣: رعب البرج الساقط (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

البرج الساقط هو إحدى ألعاب مدينة الملاهي المرعبة والتي تُربط فيها على مقعد بواسطة حزام، ثم تُرفع عالياً في الهواء، ثم تُسقط. حينما تكون في سقوط حر، ما هو وزنك الظاهري؟

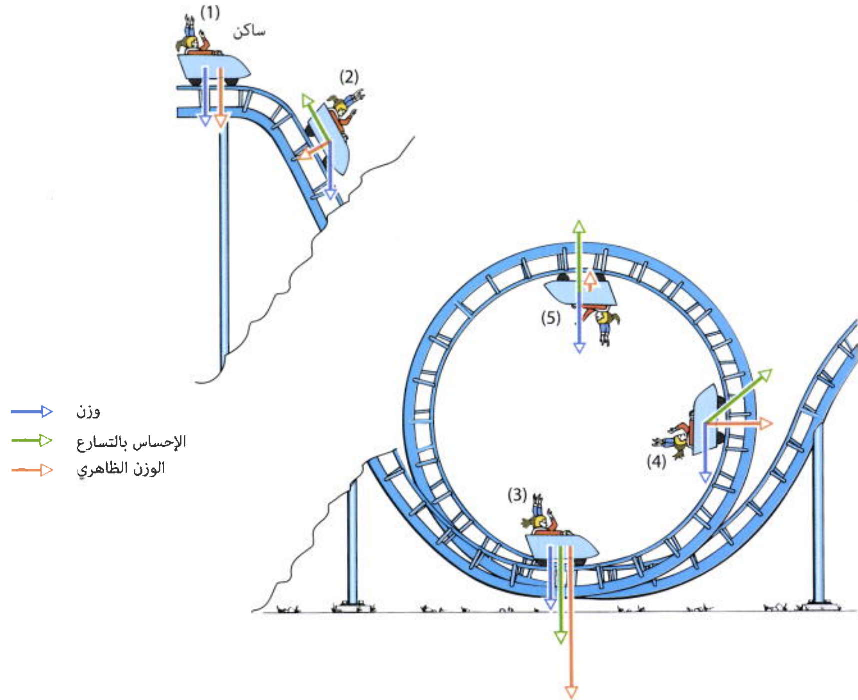
حلقات الأفعوانية

يبين شكل (٧،٣،٣) أفعوانية ذات مقطورة واحدة في مواضع متعددة على طول مسار بسيط يتكون من مرتفع واحد وحلقة واحدة. الوزن، والإحساس بالتسارع، والوزن الظاهري جميعها كميات متجهة، كما أن سرعة المقطورة وتسارعها هي كميتان متجهتان أيضاً. يشار إلى تلك الكميات بأسهم مختلفة الأطوال توضح اتجاه كل متجه ومقداره. كلما زاد طول السهم، زاد مقدار الكمية التي يمثلها.

عند قمة المرتفع الأول في الشكل (٧،٣،٣)، تكون الأفعوانية ذات المقطورة الواحدة تقريبا ثابتة (1). تشعر أنت الراكب بوزنك فقط باتجاه الأسفل - لا يوجد شيء مثير حتى الآن. لكن حالما تبدأ المقطورة بالهبوط، وتتسارع إلى أسفل المسار، يظهر إحساس بالتسارع مشيراً لأعلى المسار (2). مجموع وزنك وإحساسك بالتسارع يعطيك وزناً ظاهرياً صغيراً جداً يشير للأسفل وإلى المسار. يجد أكثر الناس أن هذا الانخفاض المفاجئ في الوزن الظاهري مرعب. إن أجسامنا حساسة جداً لانعدام الوزن الجزئي، وهذا الإحساس بالهبوط هو نصف متعة الأفعوانية. رائد الفضاء، الساقط سقوطا حرا في الفضاء، لديه هذا الشعور المزعج بانعدام الوزن لأيام طويلة. لا عجب أن رواد الفضاء لديهم مشاكل دوار الحركة (أو بالأحرى التسارع) بشكل مستمر.

على الأرض، لا يدوم الشعور بانعدام الوزن طويلا، فهو يحدث فقط أثناء التسارع للأسفل ويختفي عندما تستوي المقطورة بالقرب من قاع المرتفع. في الوقت الذي تبدأ به المقطورة صعود الحلقة، تسير بالسرعة القصوى وتكون قد بدأت بالتسارع للأعلى (3). هذا التسارع للأعلى ينشئ إحساساً بالتسارع للأسفل بحيث أن وزنك الظاهري يصبح كبيراً جداً وباتجاه الأسفل. تشعر أنك مضغوطاً إلى مقعدك حينما تواجه إحساساً بالتسارع مقداره 2 أو 3 g.

هذه الرحلة على طول الحلقة تشابه الحركة الدائرية المنتظمة. فهي تقريبا مثل أخذ دورة واحدة حول دوّامة



شكل ٧،٣،٣: تسير أفعوانية ذات مقطورة واحدة من فوق المرتفع الأول وتدور في حلقة. عند كل نقطة على طول المسار، تواجه المقطورة وزنها، وإحساساً بالتسارع نتيجة لتسارعها الحالي، ووزناً ظاهرياً هو حاصل جمع هذين الاثنين. يشير الوزن الظاهري دائما باتجاه المسار فلا تسقط المقطورة منه.

رأسية. ولكن حينما تصعد المقطورة داخل الحلقة، يصبح بعض من طاقتها الحركية طاقة جذب كامنة وتتباطأ المقطورة. عندما تبدأ المقطورة بالهبوط للخروج من الحلقة، تعود طاقة الجذب الكامنة هذه لطاقة حركية فتتسارع المقطورة. نتيجة لهذه التغيرات في السرعة، فإن تسارعك لن يكون بالضبط للداخل باتجاه مركز الحلقة والإحساس بالتسارع الذي تشعر به ليس بالضبط للخارج. رغم ذلك، فالتسارع للداخل والإحساس بالتسارع للخارج هما تقريبان جيدان لما يحدث.

في منتصف الصعود داخل الحلقة، يكون تسارعك الحقيقي للداخل وللأسفل، فيكون إحساسك بالتسارع الذي تواجهه هو للخارج وللأعلى (4). وزنك الظاهري مازال أكثر بكثير من وزنك ويتجه للخارج. تشعر أنك مضغوط إلى مقعدك، والمقطورة ذاتها تُضغط نحو المسار (شكل ٨،٣،٣).

أخيراً، تصل قمة الحلقة (5). تباطأت المقطورة بعض الشيء نتيجة لصعودها ضد قوة الجاذبية. ولكنها مازالت تتسارع باتجاه مركز الدائرة، ومازلت تواجه إحساساً بالتسارع للخارج، وفي هذه الحالة، للأعلى. وزنك للأسفل، ولكن الإحساس بالتسارع للأعلى يتجاوز وزنك، فوزنك الظاهري يكون للأعلى (شكل ٦،٣،٣)!

شكل ٨،٣،٣: تدفع الأفعوانية هؤلاء الركاب للداخل أثناء دورانها في الحلقة. يواجه الركاب إحساساً قوياً بالتسارع باتجاه الخارج وبالكاد يستطيعون أن يعرفوا أنهم منقلبون رأسا على عقب.

تشاد سلاتيري/ستون/صور جيتي



إن الأمر لا يقتصر على بقاء المقطورة المقلوبة على المسار، بل وتشعر بإحساس ضعيف شبيه بالوزن يضغطك إلى المقعد. في الحقيقة، تدفعك المقطورة لتساعد الجاذبية في تسريعك حول الحلقة.

إذا انخلعت قبعتك عند قمة الحلقة، فستهبط في مقعدك، حتى وإن كان يبدو ذلك أنه يتضمن نوعاً من الحركة للأعلى. في الواقع، تتسارع المقطورة للأسفل مباشرة تقريباً بمعدل أسرع من سقوط قبعتك الحر. الجاذبية والمسار سوية يدفعان المقطورة للأسفل بسرعة بحيث تتجاوز القبعة - قبعتك في الحقيقة تسقط ولكن المقطورة تهبط بسرعة أكبر.

في الحقيقة، الحلقة المعتادة ليست دائرية تماما؛ فهي أكثر حدة في التقوس عند القمة منه عند الجوانب أو القاع. هذا التغير في نصف القطر، والذي هو كشكل الدمعة، يتم اختياره للأمان والراحة. بزيادة حدة التقوس فقط في القمة، فإن المسار ذا الشكل الدمعي يزيد من التسارع للأسفل هناك بينما يخفض التسارع في أي مكان آخر على المسار. يكون التسارع الكبير مهماً فقط عندما تكون الأفعوانية مقلوبة رأسا على عقب. في أي موقع آخر، يجعل التسارع الكبير الراكب يشعر بثقل وعدم راحة، بالذات عند قاع الحلقة حيث يكون القطار يسير بسرعته القصوى ويتسارع للأعلى بسرعة.

إن العديد من مسارات الأفعوانية مصممة بحيث يُبقي التسارع الركاب مضغوطين إلى مقاعدهم حتى عندما تكون المقطورات مقلوبة رأسا على عقب. من حيث المبدأ، الأفعوانيات التي تسير على مثل تلك المسارات لا تحتاج أحزمة أمان لمنع الركاب من السقوط (بالرغم من أن أحزمة الأمان مصدر راحة للركاب وشركات التأمين). ولكن بعض مسارات الأفعوانية لها مقطورات وأحزمة أمان خاصة تسمح بأن يكون لها أوزان ظاهرية بعيدة عن المسار. هذه الأفعوانيات يمكنها أن تنقلب رأسا على عقب دون تسارع كافٍ للأسفل يساعد في إبقاء الركاب في مقاعدهم. في هذا النوع من الأفعوانيات، يشعر الركاب وكأنهم معلقون وإذا فقد أحدهم قبعته، فإنها ستسقط للأرض بدلا من أن تسقط إلى المقطورة.

ماذا عن الأفعوانية التي لها أكثر من مقطورة واحدة؟ عموماً، تنطبق عليها نفس القواعد. ولكن الآن هناك قوى جديدة تؤثر على كل مقطورة: القوى المبذولة من المقطورات الأخرى الموجودة في القطار. إن تأثيرات هذه المقطورات تكون أكثر وضوحاً عند قمة المرتفع الأول والأكبر. حينما ينفصل القطار عن السلسلة الرافعة ويقترب من الهبوط، فإنه يتدحرج إلى الأمام ببطء وتكون المقطورات التي في المقدمة قد تجاوزت قمة المرتفع قبل أن تتمكن من اكتساب سرعة كبيرة (شكل ٩،٣،٣ أ). هذه المقطورات الأمامية تسحب المقطورات التي خلفها بشدة، والمقطورات الخلفية بدورها تسحبها للخلف، فيتباطأ هبوطها. في الوقت الذي يكون فيه القطار متحركاً بسرعة كبيرة، تكون المقطورة الأولى قد وصلت إلى حد بعيد لأسفل المرتفع.

آنذاك، يبدأ المسار بالانعطاف نحو الأعلى فيواجه ركاب المقطورة الأولى في الغالب تسارعاً للأعلى وإحساساً بالتسارع للأسفل. لهذا لا يشعر ركاب المقطورات الأمامية من الأفعوانية بإحساس كبير بانعدام الوزن. على النقيض من ذلك، تتحرك المقطورة الأخيرة بسرعة عالية عند البدء في هبوطها. فهي تواجه تسارعاً هائلاً للأسفل أثناء جذبها بعنف من فوق قمة المرتفع الأول بواسطة المقطورات التي أمامها (شكل ٩،٣،٣ ب).

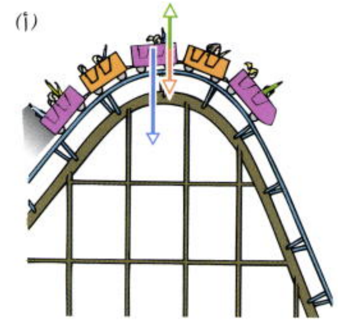
نتيجة لذلك، يشعر ركابها بإحساس تسارع كبير للأعلى وانعدام للوزن عظيم. في الحقيقة، يجب أن يحذر مصممو المسارات من جعل التسارع للأسفل سريعاً جدا، وإلا فإن ركاب المقطورة الأخيرة سيقذفون من مقاعدهم.

تحقق من فهمك # ٤: الانطلاق في الهواء (للإجابة، انظر صفحة ١٠٣)

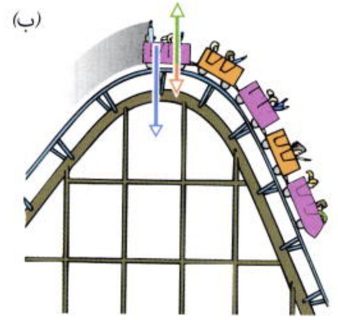
تتحرك سيارة سباقك فوق مطب في الطريق وفجأة تنطلق في الجو. ما الذي يبقيك في الهواء؟ هل اختفت الجاذبية؟

من الواضح أن مكان جلوسك في الأفعوانية مهم. يوفر المقعد الأمامي المشهد الأكثر إثارة، ولكنه يوفر شعوراً أقل إثارة بالنسبة لانعدام الوزن. توفر المقطورة الأخيرة دائما تقريباً أفضل شعور بانعدام الوزن. من المحتمل أن أكثر المقاعد مللاً في الأفعوانية هو المقعد الثاني؛ فهو يوفر جولة وديعة نسبياً ومنظراً غير متغير للأشخاص الذين يجلسون في المقعد الأمامي.

(أ)



(ب)



شكل ٩،٣،٣: عندما تهبط أفعوانية ذات مقطورات متعددة من المرتفع الأول، فإن ما يواجهه الركاب في المقطورات الأولى مختلف عن ما يواجهه ركاب المقطورات الأخيرة. (أ) تتحرك المقطورات الأمامية من فوق قمة المرتفع ببطء وتصل لسرعة عالية فقط عندما تصل إلى حد بعيد أسفل المرتفع. فالمقطورات التي خلفها تبطيء من هبوطها. (ب) تسحب المقطورات الخلفية بشدة من فوق القمة وتتحرك بسرعة عالية جداً مبكراً. تتسارع المقطورات الأخيرة للأسفل بشكل هائل أثناء اجتيازها المرتفع الأول ويواجه ركابها شعوراً شديداً بانعدام الوزن.

خاتمة الفصل الثالث

في هذا الفصل نظرنا في المفاهيم الفيزيائية التي تكمن في أربعة أنواع من الآلات البسيطة. في قسم الموازين الزنبركية، استكشفنا العلاقة بين القوة المؤثرة على زنبرك والتشوه الحاصل له، وفحصنا كيف أن هذا التشوه يمكن أن يستخدم لقياس وزن الجسم.
في قسم الكرات المرتدة، فحصنا عملية تخزين وإطلاق الطاقة الحركية أثناء التصادم. كما رأينا، كل من الكرة والجسم الذي تصطدم به يساهم في الارتداد.
في قسم دوّامات الملاهي والأفعوانيات، استكشفنا كلاً من الأحاسيس التي نشعر بها عندما نتسارع ولماذا تحدث هذه الأحاسيس. رأينا أن الحركة الدائرية تتضمن تسارعاً يتجه للمركز والذي يسبب في الشعور بتسارع متجه للخارج.

تفسير: أرجحة الماء فوق رؤوسنا

حينما تأرجح الدلو فوق رأسك، فأنت تجذبه للأسفل وتتسبب في تسارعه للأسفل بسرعة. يظل الماء في الدلو المقلوب لأن الدلو يتسارع للأسفل بمعدل أسرع من معدل تسريع الجاذبية وحدها للماء. على الرغم من أن الماء له حرية السقوط، ولكن الدلو يدرك الماء الساقط. نتيجة لذلك، ينضغط الماء إلى قاع الدلو. يحدث التأثير ذاته عندما تدفع كتاباً للأسفل براحة يدك بشكل سريع. على الرغم من أن الكتاب له حرية السقوط، لكنه يظل مضغوطاً إلى راحة يدك لأن يدك تقوم بتسريعه للأسفل بشكل أسرع من تسريع الجاذبية. أخيرا، إذا توقفت عن أرجحة الدلو فجأة، فإن محتويات الدلو لن تتباطأ معه. بل ستنسكب المحتويات أو تتحطم.

ملخص الفصل

كيفية عمل الموازين الزنبركية

يقيس الميزان الزنبركي وزن الجسم بدعم ذلك الجسم بزنبرك، عندما يكون الجسم ساكنا، توازن قوة الزنبرك للأعلى تماما وزن الجسم للأسفل؛ عندها يعرض الميزان قوة الإرجاع للأعلى التي يبذلها زنبركه على الجسم. وكما يصف قانون هوك، فإن قوة الإرجاع تلك تتناسب مع مقدار تشوه الزنبرك، لذا يستطيع الميزان أن يحدد ذلك عن طريق قياس مدى انحناء الزنبرك، وكثيراً ما يتم هذا القياس بطريقة ميكانيكية ويُعرض عن طريق إبرة أو قرص مدرّج.

كيفية عمل الكرات المرتدة

تسلك الكرة نفس سلوك الزنبرك الكروي أو المستطيل. يخزن الزنبرك الطاقة المرنة الكامنة عندما يتشوه بعيدا عن شكله المتزن ويطلق بعضاً من تلك الطاقة أثناء عودته إلى الوضع الطبيعي. عندما ترتطم كرة بسطح، يُزال جزء من الطاقة الحركية من الكرة والسطح وإما أن يخزن هذا الجزء في تلك الأجسام كطاقة كامنة مرنة أو يفقد كطاقة حرارية. حينما ترتد الأجسام، يتحول بعض من الطاقة المختزنة لطاقة حركية مرة أخرى. تكون الطاقة الحركية المرتجعة – طاقة الارتداد – دائما أقل من الطاقة الحركية الابتدائية المزالة من الأجسام – طاقة التصادم. تحولت الطاقة المفقودة إلى طاقة حرارية.

كيفية عمل دوّامات الملاهي والأفعوانيات

تستخدم دوّامة الملاهي التسارع المركزي لتعطي كل راكب إحساساً بالتسارع للخارج. بدمج ذلك مع الوزن، فإن هذا الشعور الشبيه بالجاذبية يعطي الراكب وزناً ظاهرياً يشير للأسفل وللخارج.
كما تستخدم الأفعوانية التسارع السريع لتكوين أوزان ظاهرية غير اعتيادية لركابه. كلما تسارع القطار على مرتفع أو منعطف، واجه الراكب إحساساً بالتسارع في اتجاه معاكس للتسارع. هذا الإحساس بالتسارع، مدموجا مع وزن الراكب، يكوّن وزناً ظاهرياً يتغير بشكل مفاجئ في المقدار والاتجاه أثناء الجولة. إنه هذا التغير في الوزن الظاهري، بالذات عندما يقترب من الصفر، هو ما يجعل ركوب الأفعوانية مثيراً جدا.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون هوك: قوة الإرجاع التي يبذلها جسم مرن تتناسب مع مقدار التشوه الذي حصل له بعيدا عن شكله المتزن، أو

قوة الإرجاع = - ثابت الزنبرك × التشوه (١,١,٣)

٢. تسارع جسم يتحرك حركة دائرية منتظمة: الجسم الذي يتحرك حركة دائرية منتظمة له تسارع مركزي مساوٍ لمربع سرعته مقسوما على نصف قطر مساره الدائري، والذي يساوي مربع سرعته الزاوية مضروبا بنصف قطر مساره الدائري، أو (١,٣,٣)

$$\text{التسارع} = \frac{(\text{السرعة})^2}{\text{نصف القطر}} = (\text{السرعة الزاوية})^2 \times \text{نصف القطر}$$

تحقق من فهمك - الإجابات

٣-١ الموازين الزنبركية

١. يجب أن تبيع على حسب الكتلة، مثلا بالكيلوجرام أو رطل-الكتلة.

لماذا: إذا وصفت منتجاتك بناءً على الوزن، فأنت تحدد قوة الجاذبية التي تؤثر عليها بالقرب من سطح الأرض. عند تصديرها للقمر، هذه المنتجات سيكون لها وزن هو سدس ما هو على الأرض، ومن المحتمل أن تُغرّم شركتك لبيعها منتجات أقل وزنا من المذكور على الملصق. إذا وصفت المغلفات بناء على كتلتها، فإن الملصق التعريفي سيظل صحيحا في جميع الأماكن التي ترسل لها هذه المغلفات. فالكتلة هي مقدار القصور الذاتي وتعتمد فقط على الجسم، وليس على بيئته.

٢. تتصرف لوحة القفز كما لو كانت زنبركاً، فتنحني للأسفل بالتناسب مع وزن كل غوّاص.

لماذا: كلما زاد وزن الغوّاص، زاد انحناء اللوح للأسفل قبل أن يبذل قوة كافية للأعلى على الغوّاص لتوازن وزن الغوّاص.

٣. 15N (حوالي 3.3lbf).

لماذا: إن تدريج الميزان يوضح ببساطة موضع كفته. يعايَر التدريج بحيث يشير هبوط الكفة لمسافة 1cm إلى أن الزنبرك يجذبها للأعلى بقوة مقدارها 5N. بما أن قوة إرجاع الزنبرك توصف بقانون هوك، فإن هبوط الكفة لمسافة 3cm يعني أن الزنبرك يبذل على الكفة قوة للأعلى مقدارها 15N .

٤. المسافة التي يتحركها سطح الميزان للأسفل تتناسب مع الوزن الذي يوضحه.

لماذا: يتصل زنبرك الميزان بسطحه بواسطة روافع بحيث أنه لو تحرك السطح للأسفل، فإن الزنبرك سيتشوه بمقدار يتناسب مع ذلك. يُعرض تشوه الزنبرك على التدريج. وهكذا فإن قراءة التدريج تتناسب مع حركة السطح للأسفل.

٥. ارفع كل ركن من أركان الحقيبة وانظر أيها يحتاج أكبر قوة رفع للأعلى. يجب أن تكون الكتب بالقرب من ذلك الركن.

لماذا: برفع كل ركن من أركان الحقيبة، فأنت تحدد موقع مركز ثقل الحقيبة. كلما زادت القوة المحتاجة لرفع ركن ما للأعلى، كان هذا الركن قريبا أفقيا من مركز ثقل الحقيبة والكتب ذاتها.

٣-٢ الكرات المرتدة

١. عندما تصطدم البلية بسطح الصوان الصلب، فإنها تنبعج للداخل وتحول معظم طاقتها الحركية لطاقة كامنة مرنة. بعد ذلك ترتد، محولة هذه الطاقة المختزنة لطاقة حركية مرة أخرى حينما ترتد من على السطح.

لماذا: البلية المرنة لها معامل ارتداد عالٍ وترتد بشكل جيد من على سطح صلب.

٢. التراب الأملس يتشوه أكثر من البلية الصلبة ويستقبل معظم طاقة التصادم. يحول التراب معظم تلك الطاقة لطاقة حرارية فترتد البلية بشكل ضعيف.

لماذا: مع أن البلية ترتد بشكل أفضل من على السطح الصلب، فإن التراب أملس ويستقبل واقعياً كل طاقة التصادم عندما ترتطم به البلية الصلبة. يتشوه التراب أثناء التصادم ولكنه لا يختزن إلا القليل من الطاقة لأنه غير مرن. لا ترتد البلية كثيراً في هذه الحالة.

٣. 2m/s (6.6ft/s) نحوك.

لماذا: إن السرعات المذكورة في السؤال هي السرعات المشاهدة من قبل أشخاص يجلسون بسكون بالنسبة للدائرة. من الإطار المرجعي القصوري لبليتك، فإن الدائرة ذاتها تتجه نحوك بسرعة 1m/s. بما أن بلية الشخص الآخر تتحرك نحوك بسرعة 1m/s أكثر من سرعة الدائرة، فإن سرعتها الكلية بالنسبة لبليتك هي 2m/s باتجاهك.

٤.الكرة الزجاجية لها كتلة أكبر بكثير من كتلة إبهامك بحيث يستقبل إبهامك معظم طاقة الارتداد. يرتد إبهامك، وليس الكرة الزجاجية.

لماذا: في أي تصادم، يواجه الجسم ذو الكتلة الأقل التسارع الأكبر ويستقبل القسم الأكبر من طاقة الارتداد. يشابه هذا التأثير ما يحدث عندما تأرجح مضرب بيسبول خفيفاً مصنوعاً من الألمنيوم للتصدي لكرة بولنج مقذوفة. سوف يرتد المضرب بعنف ولكن كرة البولنج ستستمر في الحركة باتجاه الماسك. هذا التأثير أيضا صحيح في حالة تصادم السيارات، حيث يحدث اضطراب أقل للسيارة الضخمة عند اصطدامها بسيارة صغيرة جدا.

٣-٣ دوامات الملاهي والأفعوانيات

١. يبذل مقعد السيارة وبابها قوة عليك باتجاه اليسار، والتي تتسبب في تسارعك

لليسار مع السيارة. أنت أيضا تواجه إحساساً بالتسارع باتجاه اليمين، حينما يعمل قصورك الذاتي على منعك من التسارع لليسار.

لماذا: حينما تنعطف السيارة لليسار فإنها تتسارع باتجاه اليسار. كل من مقعد السيارة والباب الأيمن يبذلان قوة عليك باتجاه اليسار، لمنع السيارة من الانسحاب من تحتك. لأن لجسمك كتلة، فإنه يقاوم هذا التسارع لليسار. تشعر أن جسمك يحاول السير في خط مستقيم والذي سيدفعه خارج باب السيارة الأيمن عندما تتسارع السيارة باتجاه اليسار.

٢.الانعطاف المنحدر مطلوب لكي توفر القوة الداعمة المبذولة من قبل مسار حلبة السباق على عجلات السيارة على الأقل بعضاً من التسارع المركزي اللازم لتسريع السيارة حول المنعطف.

لماذا: حينما تتحرك السيارة والسائق حول منعطف دائري، فإنهما يتسارعان نحو مركز المسار ويتطلبان قوة مركزية هائلة للداخل. على المسار المستوي، فإن القوة الأفقية الوحيدة المتوفرة هي الاحتكاك الساكن بين الأرض وعجلات السيارة. إذا لم يستطع الاحتكاك الساكن توفير قوة كافية للداخل، فإن السيارة ستتزحلق خارج الحلبة، متبعة بذلك مسار خط مستقيم. هذا النوع من الحوادث معتاد في منعطفات الطرق السريعة في أيام تجمد الطريق ولهذا يقوم المصممون بجعل المنعطفات منحدرة. إن المنحدرات هي منزلقات تميل باتجاه المركز بحيث أن المركّبة الأفقية للقوة الداعمة المبذولة من المسار على عجلات السيارة توفر قوة مركزية إضافية نحو الداخل لمساعدة السيارة في التسارع حول المنعطف.

٣. صفر.

لماذا: حينما تسقط سقوطا حرا، فأنت تتسارع للأسفل بأقصى قيمة للتسارع بسبب الجاذبية. إن الإحساس بالتسارع للأعلى الذي تواجهه يتساوى بالضبط مع وزنك للأسفل، بحيث يصبح وزنك الظاهري صفرا. تشعر بانعدام الوزن تماما.

٤. الجاذبية مازالت موجودة، ولكن قصورك الذاتي يمنعك من متابعة سريعة لانحدار المطب الموجود على سطح الطريق الذي تسير عليه.

لماذا: إذا انعطف الطريق الذي تسير عليه فجأة للأسفل، فيجب أن تتسارع للأسفل لكي تستمر في الاتصال مع سطحه. كلما كان الانحدار أكثر شدة والهبوط مفاجئاً، احتجت لتسارع أكبر للأسفل. القوة الوحيدة باتجاه الأسفل التي تواجهها هي وزنك، والذي يمكن أن يسبب تسارعاً للأسفل ليس أكثر من $9.8m/s^2$ ($32ft/s^2$). إذا هبط السطح من تحتك بأسرع من ذلك، فستحلق في الجو. ستكون عندها في حالة سقوط حر وتتسارع للأسفل بأقصى تسارع تسمح به الجاذبية. في نهاية الأمر، ستسقط على السطح. في العديد من الألعاب الرياضية، بما في ذلك التزلج على الجليد، وسباق الدراجات النارية، ولوحات التزلج، فإن الشخص الذي يسير على طول سطح غير مستوٍ يصبح في حالة تحليق بعد مروره فوق مطب.

دقق في أرقامك - الإجابات

٣-١ الموازين الزنبركية

١. 2cm و 10cm (بفرض أن الأرضية لا تنكسر).

لماذا: تتصرف الأرضية - مثلها مثل الأسطح المعلقة - كالزنبرك. تتشوه أرضيتك بمقدار 1cm قبل أن تبذل قوة إرجاع للأعلى مساوية لوزن عشرة ضيوف، بالتالي ستتشوه بمقدار 2cm قبل أن تدعم عشرين ضيفاً، و10cm قبل أن تدعم مائة ضيف. مع أنه من المفروض أن يظل هذا التشوه ضمن حد مرونة عوارض الأرضية، إلا أنه قد يتسبب في تشققات في الطلاء والصمغ. إذا انكسرت العوارض، فإن الأرضية ستنهار.

٣-٣ دوامات الملاهي والأفعوانيات

١. حوالي $15m/s^2$ ($50ft/s^2$)

لماذا: بما أن الأطفال يتحركون حركة دورانية منتظمة، فإن تسارعهم يعطى بالمعادلة (٣,٣,١). تدور الدوّامة مرة كل ثانيتين، لذا فإن سرعتها الزاوية هي 2π راديان مقسومة على ثانيتين. بحذف «راديان» لأنها الوحدة الطبيعية للزوايا، فإن سرعة الدوامة الزاوية هي$1/s$ π. بما أن نصف قطرها هو 1.5m، فإن تسارع الأطفال يكون

$$\text{تسارع الأطفال} = (\pi 1/s)^2 \,.\, 1.5m = 14.8m/s^2$$

بما أن قياساتنا لنصف قطر الدوّامة وزمن دورانها دقيقة فقط لحوالي 10%، فإن حسابنا لتسارع الأطفال يكون دقيقا فقط لحوالي 10 %.

فنقول أنه $15m/s^2$ ($50ft/s^2$).

تمارين

1. ما هي أوجه الشبه بين الوتر في القوس والسهم وبين الزنبرك؟

2. عندما تقوم بلف الزنبرك الرئيسي لساعة ميكانيكية، لماذا تزداد صعوبة لف المقبض مع كل لفة؟

3. يتصرف الشعر المجعد مثل زنبرك ضعيف والذي يمكن أن يتمدد تحت تأثير وزنه. لماذا تكون خصلة الشعر المجعدة أكثر استقامة في أعلاها مقارنة بأسفلها؟

4. عندما تستلقي على فراش زنبركي، فإنه يدفع بقوة أكبر على أجزاء جسمك التي تضغط عليه بشكل أعمق. لماذا لا يدفع الفراش على جميع أجزاء جسمك بالتساوي؟

٥. إذا سحبت كفة ميزان معلق في البقالة للأسفل بحيث تكون قراءته 15N، ما مقدار القوة للأسفل التي تبذلها على الكفة؟

٦. حينما تقوم بوزن نفسك على ميزان أرضي، تمد يدك وتدفع بها على طاولة مجاورة للأسفل. هل الوزن الموضح في الميزان هو وزنك الصحيح، أم أكثر، أم أقل؟

٧. يوجد ميزان أرضي على طاولة طعامك ويتسلق صديقك سطح الطاولة ليزن نفسه عليه. إن إحدى أرجل الطاولة ضعيفة وتخشى أنه سيكسرها، لذا ترفع هذا الركن من الطاولة. تظل الطاولة مستوية حينما تدفع للأعلى على الركن بقوة مقدارها 100N. هل قراءة الميزان صحيحة، أم أكثر، أم أقل؟

٨. إذا وضعت ميزانك الأرضي على منحدر ووقفت عليه، هل الوزن الذي سيوضحه هو وزنك الصحيح، أم أكبر، أم أقل؟

٩. عندما تقف على ميزان، فإن القراءة التي يعرضها هي وزنك إضافة لوزن ملابسك. إن أحذيتك فقط هي التي تلامس الميزان، فكيف يساهم وزن باقي ملابسك للوزن الموضح في الميزان؟

١٠. لكي تقوم بوزن طفل رضيع، يمكنك أن تقف على الميزان مرة مع الطفل ومرة أخرى بدونه. لماذا يساوي الفرق بين هاتين القراءتين وزن الطفل الرضيع؟

١١. الكرة المطاطية التي تفقد 30 ٪ من طاقة التصادم على شكل حرارة عندما ترتد من على سطح صلب سترتد لـ 70 ٪ من الارتفاع الذي سقطت منه. فسر نسبة النقص الـ 30٪ في الارتفاع.

١٢. أفضل مضامير الركض لها أسطح صلبة ولكن مطاطية مرنة. كيف يساعد السطح الحيوي العداء؟

١٣. لماذا يكون الركض على الرمل الناعم منهكا؟

١٤. كثيراً ما يكون للطرق الجبلية الشديدة الانحدار منحدرات طوارئ للشاحنات ذات الكوابح المعطلة. لماذا تكون هذه المنحدرات أكثر فعالية إذا كانت مغطاة برمل ناعم عميق؟

١٥. كان خلال بعض مواسم لعبة البيسبول إحراز عدد كبير من الأهداف بحيث بدأ الناس يشكون في أن هناك شيئاً غير صحيح في كرات البيسبول. ما هو التغير في كرات البيسبول الذي يمكن أن يفسر تحركها لمسافات أبعد من المعتاد؟

١٦. كثيراً ما يُطلب من المرضى أثناء مرحلة إعادة التأهيل بعد جراحة اليد أن يضغطوا على معجون لتقوية عضلاتهم. كيف يختلف تحول الطاقة عند الضغط على معجون منه عند الضغط على كرة مطاطية؟

١٧. سيارتك موجودة على طريق سريع مزدحم حيث يتجه الجميع باتجاه الجنوب بسرعة حوالي 100km/h (62mph). تتباطأ السيارة التي أمامك قليلا فتصطدم سيارتك بها بلطف. لماذا يكون التصادم لطيفاً جدا؟

١٨. سيارات التصادم هي إحدى ألعاب مدينة الملاهي حيث يقود الأشخاص عربات كهربائية صغيرة حول حلبة ويصطدم بعضهم ببعض عمداً. جميع السيارات تسير بنفس السرعة تقريبا. لماذا يُحدث التصادم الرأسي ارتجاجاً أكبر من أي نوع آخر من التصادمات؟

١٩. عندما يتحرك قطاران جنباً إلى جنب بسرعات خطرة، فإنه مازال من الممكن للأشخاص أن يقفزوا من أحد القطارين للآخر. فسر لماذا يمكن القيام بذلك بأمان.

٢٠. إذا أسقطت بلية فولاذية على أرضية خشبية، فلماذا تستقبل الأرضية معظم طاقة التصادم وتساهم بالقسم الأكبر من طاقة الارتداد؟

٢١. كرات البيسبول من نوع RIF (Reduced Injury Factor)، ذات عامل إصابة مخففة، لها نفس معامل الارتداد كأي كرة بيسبول طبيعية إلا أنها تتشوه أكثر أثناء التصادم. لماذا تقلل هذه الزيادة في التشوه من القوى التي تبذلها الكرة أثناء الارتداد وتقلل من احتمال تسببها في إحداث إصابة؟

٢٢. النعال المبطنة في أحذية العداء تخفف من حدة الارتطام بالأرضية. لماذا تقلل البطانة من مقدار القوى المسؤولة عن جعل قدميك في حالة السكون؟

٢٣. بعض الأحذية الرياضية لها جيوب هوائية قابلة للنفخ داخلها. تتصرف هذه الجيوب الهوائية مثل الزنابك والتي تصبح صلبة عندما تزيد ضغط الهواء. الضغط المرتفع يجعلك أيضا ترتد من على الأرضية بشكل أسرع. لماذا يقلل ضغط الهواء المرتفع من زمن الارتداد؟

٢٤. لماذا يكون الهبوط على وسادة أسفنجية ناعمة أقل إيذاء من الهبوط على خرسانة جرداء عند الانتهاء من القفز العالي؟

٢٥. لماذا يجب أن يكون سطح المطرقة صلباً جداً وقاسياً لكي تتمكن من إدخال مسمار في خشب؟

٢٦. بعض ألعاب مدينة الملاهي تحركك ذهاباً وإياباً باتجاه أفقي. لماذا تكون هذه الحركة أكثر إزعاجاً لجسمك مقارنة بالتحرك بسرعة عالية في طائرة نفاثة؟

٢٧. أنت تسافر في قطار في نفق على مسار مستقيم ومستوٍ بسرعة ثابتة. إذا أغمضت عينيك لن تستطيع أن تحدد في أي اتجاه تسير.
لم لا؟

٢٨. إن تحريك علبة رذاذ طلاء بسرعة في اتجاه واحد لن يخلطها بشكل جيد مثل هزها ذهابا وإيابا. لماذا من المهم تغيير الاتجاه أثناء خلط الطلاء؟

٢٩. لماذا تصدر شخشيخة الأطفال صوتاً فقط عندما يحركها الطفل ذهابا وإيابا وليس عندما يحركها الطفل بثبات في اتجاه واحد؟

٣٠. في بعض الأفعوانيات، تمر المقطورات في نفق أملس ينعطف يمينا ويسارا في سلسلة من الانحناءات المعقدة. لماذا ترتفع المقطورة دائماً على الجدار الأيمن للنفق عند الانعطاف الحاد لليسار؟

٣١. يجب أن تنعطف مسارات سكة الحديد تدريجياً لمنع القطار من الخروج عن مساره عند سيره بسرعات عالية. لماذا من المحتمل أن يخرج القطار عن مساره إذا صادف منعطفاً حاداً أثناء سيره بسرعة؟

٣٢. تستخدم الشرطة بعض الأحيان مدكّات معدنية لكسر الأبواب. فيحملون المدك بأيديهم ويأرجحونه على الباب من على بعد 1m تقريباً. كيف يمكن للمدك أن يزيد من مقدار القوة التي يبذلها الشرطة على الباب؟

٣٣. عندما تصطدم المطرقة المتحركة بالمسمار، فإنها تبذل القوة الهائلة اللازمة لدفع المسمار في الخشب. هذه القوة هي أكبر بكثير من وزن المطرقة. كيف تنتج هذه القوة؟

٣٤. وزن المطرقة يكون للأسفل، فكيف يمكن للمطرقة أن تدفع بمسمار للأعلى في السقف؟

٣٥. حينما تتأرجح ذهابا وإيابا على أرجوحة في ساحة اللعب، يتغير وزنك الظاهري. عند أي موضع تشعر أنك أثقل ما يمكن؟

٣٦. بعض المحلات لديها لعبة سيارات تعمل بالعملة وتهتز ذهابا وإيابا على قاعدة

ثابتة. لماذا لا تستطيع أن تعطيك هذه السيارات الشعور بأنك تقود السيارة حقيقة في سباق سيارات؟

٣٧. دوار السلطة هو سلة تدور حول نفسها لتجفيف الخضروات بعد غسلها. كيف يمكن لدوار السلطة أن ينتزع الماء من الخضروات؟

٣٨. الأشخاص الذين يسقطون من لوحة غطس عالية يشعرون بانعدام الوزن. هل توقفت الجاذبية عن بذل قوة عليهم؟ إذا كانت الإجابة لا، لماذا إذاً لا يشعرون بها؟

٣٩. عندما تسير سيارتك بسرعة فوق مطب في الطريق، تشعر فجأة بانعدام الوزن. فسر ذلك.

٤٠. يتعلم رواد الفضاء كيفية تحمل انعدام الوزن من خلال ركوب طائرة (تسمى «مذنب القيء») والتي تتبع مساراً غير اعتيادي. كيف يوجه الطيّار الطائرة حتى يجعل ركابها يشعرون بانعدام الوزن؟

٤١. تستقل مصعداً ومعك حقيبة كبيرة بيدك. لماذا تبدو تلك الحقيبة ثقيلة فجأة عندما يبدأ المصعد بالصعود؟

٤٢. حينما تصل مركبتك لقمة لعبة الدولاب الهوائي (Ferris wheel) الذي يتحرك بيسر، في أي اتجاه يكون تسارعك؟

مسائل

١. مقعدك ذو التصميم الحديث له إطار معدني أنبوبي على شكل حرف S والذي يتصرف مثل الزنبرك. عندما يجلس صديقك، الذي يزن 600N، على المقعد، فإنه ينحني للأسفل بمقدار 4cm. ما هو ثابت الزنبرك لهذا المقعد؟

٢. لديك صديق آخر يزن 1000N. عندما يجلس هذا الصديق على المقعد المذكور في المسألة 1، ما هو مقدار الانحناء؟

٣. تقوم بعصر كرة مطاطية نطاطة في يدك. إذا دفعت بيدك عليها للداخل بقوة 1N، فإنها تنبعج للداخل بمقدار 2mm. إلى أي مدى يجب أن تقوم ببعجها قبل أن تدفع الكرة للخارج بقوة 5N؟

٤. عندما تقف على ترامبولين معين، فإن سطحه النطاط ينزاح للأسفل بمقدار 0.12m. إذا قفزت عليه بحيث ينزاح سطحه للأسفل بمقدار 0.3m، ما هي شدة دفعه إياك للأعلى؟

٥. يحاول المهندسون أن يكوّنوا «جاذبية» صناعية في محطة فضائية لها شكل حلقة وذلك بجعلها تدور حول نفسها مثل جهاز الطرد المركزي. نصف قطر الحلقة 100m. ما هي السرعة التي يجب أن تدور بها المحطة الفضائية لتعطي رواد الفضاء داخلها أوزاناً ظاهرية مساوية لأوزانهم الحقيقية على سطح الأرض؟

٦. يدور قمر صناعي حول الأرض فوق سطحها بقليل. القوة المركزية التي تجعل القمر الصناعي يتبع مسارا دائريا هي فقط وزنه، لذا فإن تسارعه المركزي هو حوالي $9.8m/s^2$ (التسارع بسبب الجاذبية بالقرب من سطح الأرض). إذا كان نصف قطر الكرة الأرضية حوالي 6375km، ما هي السرعة التي يجب أن يسير بها القمر الصناعي؟ ما هو الوقت الذي سيستغرقه القمر الصناعي لإتمام دورة واحدة حول الأرض؟

٧. عندما تضع ماء في خلاط المطبخ، يبدأ بالحركة في دائرة نصف قطرها 5cm بسرعة 1m/s. ما هو مقدار تسارع الماء؟

٨. في مسألة ٧، ما هي الشدة التي يجب أن يدفع بها جدار الخلاط للداخل على 0.001kg من الماء الذي يدور بداخلها؟

الفصل ٤

الأجسام الميكانيكية الجزء الثاني

مهما بدت الآلات الحديثة التي من حولنا متطورة، فإن معظمها مبنية لحد كبير على مبادئ بسيطة سبق أن تعرضنا لها، في هذا الفصل، سوف نتعرف على آلتين إضافيتين مبهرتين ونرى ما يجعلهما تعملان. حينما نقوم بذلك، سنجد أنفسنا نعاود زيارة مسائل مألوفة ونستكشف الجديد منها إلى أن نصل إلى أقصى ما انتهى إليه العلم.

تجربة: الكرات الطائرة المرتفعة

من ضمن القضايا الفيزيائية التي سنناقشها في هذا الفصل هو تأثيرات رد الفعل التي تدفع بالصواريخ إلى الأمام. تأثيرات رد الفعل هذه تظهر بشكل مثير في تجربة بسيطة تتضمن كرتين ذات حجمين مختلفين، كرة سلة وكرة تنس.

إذا لم تستطع أن تجد كرة سلة وكرة تنس، فإن أي كرتين نشطتين لهما كتلتان مختلفتان ستؤديان الغرض نفسه. أسقط الكرتين على حِدَة وانظر إلى أي ارتفاع ترتد. ستلاحظ فوراً أن الكرة الواحدة لا يمكن أن ترتد لارتفاع أعلى من الارتفاع الذي أسقطتها منه. فالارتداد بهذا الشكل سيعطي الكرة طاقة أكثر من الطاقة التي كانت لديها في بداية الأمر. في الواقع، بعض من طاقة الكرة ستُفقد كطاقة حرارية فلن تصل حتى للارتفاع الأصلي.
لكن ماذا سيحدث عندما تضع الكرة الصغيرة فوق الكرة الكبيرة وتسقط الكرتين سوية؟ فكر في تسلسل الأحداث التي ستحدث وحاول أن تتنبأ ماذا سيحدث. والآن قم بالتجربة. تأكد من أن الكرة الصغيرة تظل فوق الكرة الكبيرة مباشرة عند سقوط الكرتين على الأرضية. لاحظ ماذا يحدث وانظر إذا كانت النتيجة تحقق تنبؤك. قس ارتفاع الارتدادات وحاول تفسير النتيجة. يمكنك أيضاً القيام بنفس التجربة بكرات مختلفة الأحجام لتفهم ما يحدث بعمق أكبر.

بإذن من لوي بلومفيلد





دليل الفصل

تدمج الأجسام في هذا الفصل العديد من المفاهيم التي سبق أن ناقشناها وتضيف لها بضعة مفاهيم جديدة. هذه الأجسام هي: (١) الدراجات و(٢) الصواريخ. في قسم الدراجات، سنرى كيف أن الحركة والتصميم الذكي يمكن أن يجعلا من عربة غير مستقرة ظاهراً عربة مستقرة بحد كافٍ لركوبها بسهولة، حتى بدون إمساك الأيدي بمقود الدراجة. في قسم الصواريخ، سننظر لمفهوم الفعل ورد الفعل، ونرى كيف أن هذه الفكرة البسيطة تجعل من الممكن للمراكب الفضائية أن تغادر سطح الأرض وتسافر حتى باتجاه النجوم. لعرض أكثر شمولية لمحتوى هذا الفصل، اقلب للأمام لملخص الفصل في صفحة ١٢٩ .

يعيد هذا الفصل زيارة العديد من الأفكار التي وردت في الأبواب السابقة ولكنه أيضاً يقدم العديد من المفاهيم الجديدة التي يمكن أن نستخدمها. في الدراجات، سنتعلم عن الاستقرار الحركي ونستكشف قضايا يجب أن يتعامل معها النادل، والمتزلج على الماء، وعامل المخازن دائما. سنتعرض أيضا للجايروسكوب (gyroscopes) وردود أفعالها الغريبة للعزوم الدورانية. في الصواريخ، سنرى كيف أن الجاذبية تسبب في دوران الأجسام حول بعضها، وتتسبب في الحركات المعقدة للكواكب، والأقمار، والمذنبات. سننظر أيضاً للفيزياء الحديثة التي تظهر بالقرب من الدرجات القصوى للسرعة والجاذبية.



١-٤ الدراجات

الدراجة هي مركبة رائعة ذات كفاءة في الطاقة يشغلّها الإنسان. تسمح عجلاتها لراكبها بالتحرك للأمام بسهولة على الأسطح المستوية والتسارع بدون أي جهد عند الهبوط من المنحدرات. قارن بين الحركة اليسيرة للدراجة والمشي، والذي يتطلب جهداً في كل خطوة في الطريق. الدراجات هي آلات بسيطة جداً، ومعظم أجزائها المتحركة مرئية بوضوح: الدواسات، وأسنان العجلة، والكابحات، وآليّات التوجيه، على سبيل المثال. بساطة هذه الأجزاء والمقدرة على رؤيتها تجعل تصليح الدراجات عملية سهلة نسبياً، حتى للمبتدئ.

أسئلة للتفكير

لماذا تُفضل الدراجة ذات العجلتين على الدراجة ذات العجلات الثلاثة والتي تبدو أنها أكثر استقرارا؟ لماذا تقوم بميل الدراجة في الاتجاه الذي تريد أن تنعطف إليه؟ كيف يمكن السير بالدراجة دون وضع الأيدي على المقود؟ كيف يقوم الضغط على دواسة الدراجة بجعلها تتحرك إلى الأمام؟ لماذا للدراجة نظام قيادة معقد بين الدواسات وعجلتها الخلفية؟

تجارب يمكن القيام بها

إذا كنت تعرف كيف تقود دراجة، فانتبه لاستقرارها أثناء ركوبك عليها. لاحظ كيف أنك تقوم بإمالة الدراجة في الاتجاه الذي ترغب في الانعطاف إليه وكيف أن الدراجة تتوجه بشكل طبيعي لهذا المنعطف بمجرد أن تبدأ بالميل. هذا التوجه التلقائي هو جزء من سلوك الدراجة لتستقر ذاتيا. حينما تسير، لاحظ سرعة دوران الدواسات والشدة التي يجب أن تدفع بها عليها لإبقائها تدور بهذا المعدل. اصعد واهبط بعض التلال مع اختيار تروس مختلفة وانظر كيف يؤثر كل ترس على معدل تدوير الدواسات والقوى التي يجب أن تبذلها على الدواسات. لماذا تختار ترساً معيناً في حالات معينة؟ ما هو معدل تدوير الدواسة الأكثر راحة لك؟ أي قوة لتدوير الدواسة تشعر أنها أفضل؟

الدراجات الثلاثية والاستقرار الساكن

الدراجات لها مشكلة في الاستقرار. بوجود فقط عجلتين لدعمها، فإن الدراجات الساكنة تميل بسهولة. لماذا إذاً نستخدم الدراجات ذات العجلتين للتنقل؟

يمكننا البدء بالإجابة على هذا السؤال بالنظر إلى الاستقرار الساكن، استقرار الجسم عند السكون. للحصول على استقرار ساكن، يحتاج الجسم لاتزان مستقر. الاتزان يعني دائما محصلة قوة أو محصلة عزم دوراني صفرية، ولكن بالقرب من

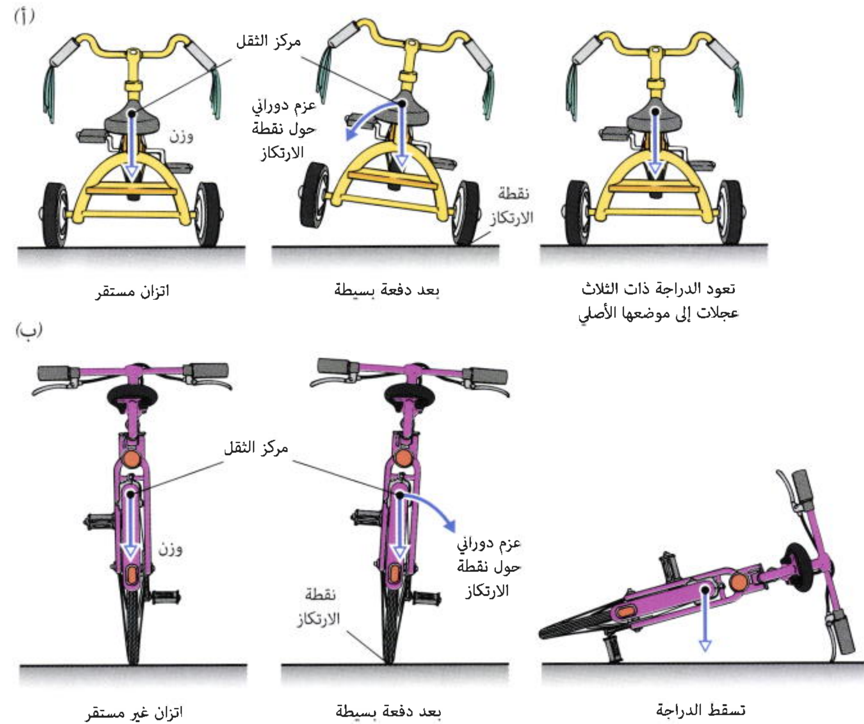
الاتزان المستقر يواجه الجسم تأثيرات إرجاعية – قوى و/أو عزوماً دورانية – تقوم بدفع الجسم لإعادته نحو الاتزان. بمعاونة تلك التأثيرات، فإن الجسم الساكن المستقر يعود لاتزانه المستقر بعد قليل من الاضطراب. المقعد الذي ليس له ظهر أو ذراعان يوضح هذا النوع من الاستقرار الساكن، ولكن الدراجة المتوازنة بالتأكيد لا توضح ذلك. إذا كنت تريد مركبة تعمل بالدواسة ومستقرة سكونيا، فجرّب الدراجة ذات الثلاث عجلات (شكل ١,١,٤).



شكل ١,١,٤: الدراجة ذات الثلاث عجلات مستقرة جدا عندما تكون واقفة بلا حراك. ولكنها تميل بسهولة أثناء الانعطاف بسرعة عالية لأن الراكب لا يستطيع أن يميل في الاتجاه الذي تميل إليه الدراجة. ويجب على الراكب تدوير الدواسات بقوة للتحرك بسرعة معقولة.

الدراجة القائمة ذات الثلاث عجلات لها اتزان ساكن لأنها تواجه تأثيرات إرجاعية عند الميل (شكل ٢,١,٤ أ). ولكن تمييز تلك التأثيرات الإرجاعية مباشرة صعب، لذا دعنا نركز بدلاً من ذلك على الطاقة الكامنة الكلية. مثل أي جسم، تتسارع الدراجة المائلة ذات الثلاث عجلات في الاتجاه الذي يقلل من طاقتها الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن. بما أن الميل الطفيف يرفع دائماً مركز ثقل الدراجة ذات الثلاث عجلات وطاقتها الجاذبية الكامنة، فإن الدراجة المائلة ذات العجلات الثلاثة يمكنها بالتأكيد التقليل من طاقتها الكامنة بالعودة للوضع القائم. فالدراجة القائمة ذات العجلات الثلاثة هي إذاً في اتزان ساكن؛ إذا لم تمل بعد فإنها لا تبدأ بالميل، وإذا مالت فإنها تتسارع حتى تعود للوضع القائم. فلا عجب لماذا يحب الأطفال الدراجات ذات العجلات الثلاثة!

هذه العلاقة بين الاستقرار الساكن والطاقة الكامنة الكلية هي علاقة عامة. لا داعي للبحث مباشرة عن التأثيرات الإرجاعية، والتي يمكن أن تكون معقدة على أية حال. عندما يكون الجسم في وضع بحيث أن طاقته الكامنة الكلية تزيد إذا انحرف في أي اتجاه، فإنه في اتزان مستقر وسيميل للبقاء في هذا الوضع. تلك القاعدة المفيدة تنطبق ليس فقط على الدراجة ذات الثلاث عجلات، بل على كل شيء من قوارب الكانو إلى الهواتف النقالة. إذا أردت جسماً أن يكون مستقراً عند السكون، اضمن أن أي انحراف طفيف يزيد من طاقته الكامنة الكلية.



شكل ٢,١,٤: (أ) دراجة ذات ثلاث عجلات في اتزان ساكن. عند اضطرابها، فإن مركز ثقلها وطاقتها الجاذبية الكامنة ترتفع، وتواجه الدراجة قوى إرجاع تعيدها لوضعها القائم. (ب) دراجة في وضع اتزان غير مستقر. أي اضطراب يتسبب في سقوطها.

الاتزان المستقر والطاقة الكامنة

يكون الجسم في اتزان ساكن عندما يزيد أي اضطراب طفيف من طاقته الكامنة الكلية.

تلك الملاحظة العامة تحدد قاعدة بسيطة مجربة حول سلوك جسم مستقل مثل الدراجة ذات الثلاث عجلات التي تقف ساكنة على سطح: سيكون ذلك الجسم في اتزان مستقر طالما أن موضع مركز ثقله فوق قاعدة دعمه – المضلع الذي يحدّد بنقاط اتصاله بالأرض. هذه القاعدة تأتي من الهندسة: إذا كان مركز ثقل جسم في موضع فوق قاعدة دعمه، فإن ميل الجسم يرفع مركز ثقله ويزيد من طاقته الجاذبية الكامنة. بفرض أن الطاقات الكامنة الأخرى غير مهمة، فإن الجسم المائل سيتسارع للعودة نـحو ذلك الاتزان وسيكون الاتزان مستقرا.

تضع الهندسة أيضاً حدوداً لاستقرار الجسم: إذا تحرك مركز ثقله خارج قاعدة الدعم الأصلية، فإنه لن يواجه تأثيرات إرجاعية ويمكنه أن ينقلب بالكامل. ولهذا، فإن الإمالة للخلف كثيراً أثناء الجلوس على دراجة ذات ثلاث عجلات يمكن أن تكون كارثة! إن عجلات الدراجة الثلاثة تشكل قاعدة دعم على شكل مثلث، لذا ستكون مستقرة سكونياً فقط إذا حافظ الراكب على أن يكون مركز الثقل الكلي فوق ذلك المثلث.

ولكن بوجود فقط عجلتين ملامستين للأرض، فإن الدراجة ذات العجلتين ليس لها قاعدة دعم (شكل ٢,١,٤ ب) وبالتالي ليست مستقرة سكونيا. بالرغم من أنها متزنة عندما تكون قائمة تماما، ولكن هذا الاتزان غير مستقر. إذا مالت الدراجة ذات العجلتين للجانب، فإن مركز ثقلها سينخفض وستقل طاقتها الجاذبية الكامنة. في الواقع، ستتسارع الدراجة بعيداعن الاتزان! وبالتالي تكون الدراجة القائمة في وضع اتزان غير مستقر؛ بدلا من مواجهة قوى أوعزوم دوران إرجاعية، فإن الدراجة المضطربة ستميل أكثر وبسرعة إلى أن ترتطم بالأرض.

التوازن غير المستقر والطاقة الكامنة

إن توازن الجسم يكون غير مستقر عندما يستطيع اضطراب طفيف أن يقلل من طاقته الكامنة الكلية.

تحقق من فهمك #١: إبقاء القهوة في مكانها (للإجابة، انظر صفحة ١٣٩)

يتسع بعض الأكواب المستخدمة في السفر للخارج عند القاعدة بحيث يكون لها قواعد عريضة. لماذا يجعل هذا الشكل مثل هذه الأكواب مستقرة بشكل خاص ويمنعها من الانقلاب أثناء الرحلات الصباحية؟

الدراجات ذات العجلتين والاستقرار الحركي

الاستقرار الساكن يهمّ معظم الناس الذين يجدون صعوبة في التوازن، لهذا يتعلم الأطفال ركوب الدراجة ذات الثلاث عجلات في بادئ الأمر (شكل ١,١,٤). ولكن عندما تتحرك الدراجة ذات الثلاث عجلات، فلا يضمن الاتزان الساكن السير بأمان. إذا نزل طفل من مرتفع شديد الانـحدار وفجأة قام بانعطاف حاد، فإنه غالباً سينقلب. ما الخلل الذي حدث؟

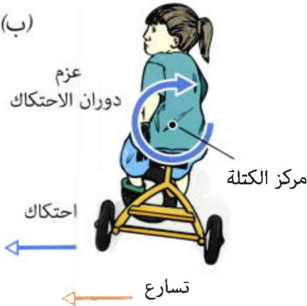
الدراجة المتحركة ذات الثلاث عجلات تظل قائمة فقط إذا تجنبت الطفلة التي تركبها التسارع المفاجئ، مثل الانعطاف بسرعة عالية. للقيام بمثل هذا الانعطاف، فإنها توجه عجلات الدراجة بحيث يدفع الاحتكاك مع الأرضية الدراجة لأحد الجوانب (شكل ٣,١,٤). تقوم قوى الاحتكاك على العجلة بتسريع الدراجة لذلك الجانب، وتعيد توجيه سرعتها بحيث تستطيع الانعطاف. وبالطبع، تحتاج الطفلة أن تنعطف أيضا، فتدفعها الدراجة معها. طالما أن الانعطاف بطئ، فالأمر

يتطلب فقط دفعة بسيطة وتنعطف الدراجة والطفلة سوية بأمان.

لكن إذا كان الانعطاف مفاجئاً، فإن الطفلة لا تكمل الانعطاف مع الدراجة. بل يستمر جسمها في الحركة بخط مستقيم بينما تنعطف الدراجة من تحتها. أي يقع حادث تحطُّم. كما ترى، فالدراجة ذات الثلاث عجلات لها استقرار ساكن جيد ولكن لها استقرار حركي غير جيد - الاستقرار أثناء الحركة.

تنقلب الدراجة لأنها لا تستطيع التعامل مع عزم الدوران الهائل الذي يبذله الاحتكاك عليها أثناء الانعطاف الحاد. بما أن قوة الاحتكاك الأفقية التي تدير الدراجة تُبذل أسفل مركز الكتلة المشترك للدراجة والراكب (شكل ٣,١,٤)، فإنها تنتج عزماً دورانياً حول مركز الكتلة. إذا كان عزم الدوران هذا صغيراً، فإن الاستقرار الساكن للدراجة سيوفر عزماً دورانياً إرجاعياً في الاتجاه المعاكس والذي يمنع أي تسارع زاوي. ولكن إذا كان الانعطاف حاداً جدا، فإن عزم الدوران الاحتكاكي الهائل سيتغلب على عزم الدوران الإرجاعي المحدود فتنقلب الدراجة والراكب. أثناء الانعطاف بسرعات عالية، فالدراجة ذات العجلات الثلاثة ليست مستقرة حركياً.





شكل ٣,١,٤ (أ): الدراجة ذات الثلاث عجلات المتجهة للأمام مستقرة لأن أي ميل يسبب في رفع مركز ثقلها للأعلى. (ب) ولكن أثناء الانعطاف بسرعة إلى اليسار، تتسارع الدراجة إلى اليسار ويبذل الاحتكاك قوة كبيرة لليسار على العجلات. قوة الاحتكاك هذه تنتج عزم دوران حول مركز الكتلة المشترك للدراجة والراكب ويمكن أن تتسبب في انقلاب الدراجة.

بما أن الهدف من مركبة ذات عجلات هو أن تستخدمها للذهاب لمكان ما، فإن الاستقرار الحركي في نهاية الأمر أكثر أهمية من الاستقرار الساكن. ومع أن الدراجة ذات العجلتين تفتقر استقراراً ساكنا، إلا أن الدراجة المتحركة مستقرة على نحو رائع. إن اتزانها الحركي جيد جداً بحيث أنه قريب من الصعب أن تنقلب ويمكن أيضاً قيادتها دون وضع اليدين على المقود. هذا العمل البطولي يُعد عملاً شائعاً ومثيراً ومتهوراً بين الأطفال الذين لم يدركوا بعد كم هو سهل.

كما اكتشف الفيزيائي البريطاني ديفيد جونز (شكل ٤,١,٤)، فإن الاستقرار الحركي المدهش للدراجة ذات العجلتين ينتج من نزعتها للتوجه التلقائي في أي اتجاه تميل إليه. على سبيل المثال، إذا بدأت الدراجة بالميل لليسار، فإن العجلة الأمامية ستتوجه تلقائياً باتجاه اليسار بحيث تعيد الدراجة لوضع قائم. ومع أن الدراجة الساكنة تسقط عندما يحدث لها اضطراب عن اتزانها غير المستقر، فإن الدراجة المتحركة للأمام تقاد بشكل طبيعي تحت مركز الكتلة المشترك وتعود لذلك الاتزان غير المستقر.

هناك آليتان فيزيائيتان تعملان سويًا لإنتاج هذا التأثير للتوجيه التلقائي: إحداهما تتضمن الدوران والأخرى تتضمن الطاقة الكامنة. الآلية الأولى تستند على العجلات فقط: تتصرف العجلات مثل الجايروسكوب. بما أن كل عجلة تدور، فإن لها كمية حركة زاوية وتنزع للاستمرار بالدوران بسرعة زاوية ثابتة حول محور ثابت

بإذن من د. دايفيد جونز



شكل ٤,١,٤: في عام ١٩٧٠م، درس الفيزيائي البريطاني ديفيد جونز أصول الاستقرار الحركي للدراجة. لقد قام ببناء سلسلة من الدراجات «غير الصالحة للركوب»، بما في ذلك دراجة كانت لها عجلة أمامية صغيرة جدا والتي كانت دائما تنزلق وتصبح ساخنة جدا أثناء ركوب الدراجة. وجد جونز أن تأثيرات الجايروسكوب وحدها لم تفسر استقرار الدراجة. لقد اكتشف أن هذا الاستقرار يأتي أيضاً من شكل الشوكة الأمامية.



شكل ٥,١,٤ أحد أسباب كون الدراجة مستقرة عندما تتحرك للأمام هو أن العجلة الأمامية تمس الأرض خلف محور التوجيه. نتيجة لذلك، فالعجلة الأمامية تتوجه بشكل طبيعي نحو اتجاه ميل الدراجة وتعيد الدراجة لوضعها القائم.

في الفضاء. بما أن كمية الحركة الزاوية للعجلة يمكن أن تتغير فقط بعزم دوراني، فإن لها نزعة طبيعية لإبقاء وضعها القائم.

ولكن كمية الحركة الزاوية وحدها لا تمنع الدراجة ذات العجلتين من الانقلاب، كما أنها لا تمنع الدراجة ذات الثلاث عجلات من الانقلاب أيضا. بدلاً من ذلك، فإنها تحضُّ الدراجة للتوجه التلقائي عن طريق ترنح الجايروسكوب - تمركز محور دوران الجايروسكوب والذي ينشأ عن عزم دوران مبذول عمودياً على كمية حركته الزاوية. عندما تكون الدراجة قائمة، فلا تبذل الأرض المرصوفة أي عزم دوراني عمودياً على العجلة الأمامية. ولكن عندما تميل الدراجة لليسار، فإن قوة دعم الأرض للأعلى لا تعود متجهة نحو مركز كتلة العجلة وتنتج عزماً دورانياً عموديًا على العجلة. هذا العزم الدوراني هو ما يجعل العجلة تترنح؛ محور دورانها يتمركز نحو اليسار وبالتالي يوجه الدراجة للأمان!

يساعد ترنح الجايروسكوب في عملية التوجيه التلقائي هذه تأثير آخر بسبب الطاقة الكامنة. بسبب شكل وزاوية الشوكة الداعمة للعجلة الأمامية، فإن الدراجة المائلة يمكنها أن تخفض مركز ثقلها وطاقتها الكامنة الكلية بتوجيه عجلتها الأمامية نحو اتجاه ميل الدراجة. عندما تميل الدراجة لليسار، فإن عجلتها الأمامية تتسارع باتجاه اليسار – الاتجاه الذي يقلل من الطاقة الكامنة الكلية للدراجة بأسرع ما يمكن. مرة أخرى تتوجه الدراجة تلقائياً نحو الاتجاه الذي تميل إليه وتتجنب السقوط. هذه التأثيرات للتعديل الذاتي تفسر لماذا يمكن للدراجة التي ليس لها راكب أن تبقى منتصبة لفترة طويلة عندما تدفعها للأمام أو تتركها للهبوط من منحدر.

هناك القليل الذي يمكن أن يعمله مصمم الدراجة لتغيير تأثير الجايروسكوب، ولكن تأثير الطاقة الكامنة يعتمد على شكل الشوكة وزاويتها. لكي تكون مستقرة، يجب أن تلامس العجلة الأمامية الأرض في نقطة خلف محور التوجيه (شكل ٥,١,٤). إذا كان هناك خلل في الشوكة، بحيث تلامس العجلة الأرض في نقطة أمام محور التوجيه، فإن الدراجة ستتوجه في الاتجاه الخاطىء عندما تميل وتصبح غير صالحة للركوب عملياً.

إن الشوكة الأمامية في دراجة البالغين الاعتيادية تتقوس للأمام بحيث تمس العجلة الأرض في موضع خلف محور التوجيه مباشرة. هذه الوضعية تجعل الدراجة في حالة استقرار حركي كافٍ لقيادتها إضافة للمقدرة العالية للمناورة. على النقيض من ذلك، فإن الشوكة الأمامية لدراجة الأطفال الاعتيادية مستقيمة نسبياً بحيث تمس العجلة الأرض في موضع بعيد جداً خلف محور التوجيه. لذا، فإن دراجة الطفل مستقرة حركياً أكثر بكثير من دراجة البالغين ولكنها أقل سهولة عند إدارتها. إن المبادلة بين الاستقرار الحركي والمقدرة على المناورة معضلة كونية، تظهر ليس فقط في العربات التي تعمل بالدواسة، ولكن في السيارات، والسفن، والطائرات أيضا.

تحقق من فهمك #٢: مثل العملة المتدحرجة (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

إن توقيف عملة معدنية على حافتها أمر صعب، ولكن العملة النقدية المتدحرجة تظل منتصبة بسهولة. ما هو التأثير الذي يحفظ توازن العملة المعدنية المتحركة؟

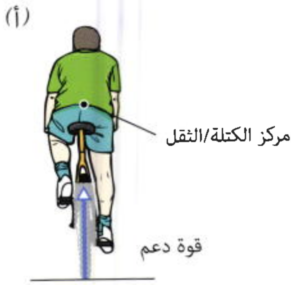
الميل أثناء الانعطاف

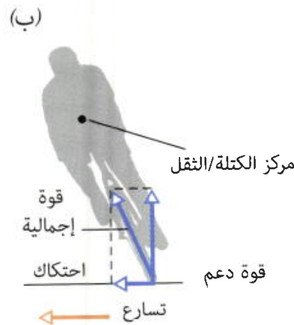
فلماذا إذاً يميل راكب الدراجة أثناء الانعطاف؟ الإجابة هي أن الإمالة يمكنها أن توازن عزم الدوران الذي يبذله الاحتكاك عليه أثناء الانعطاف، وهو نفس عزم الدوران الاحتكاكي الذي قلب راكبة الدراجة ذات الثلاث عجلات التعيسة. بالإمالة الصحيحة، يمكن لراكب الدراجة أن يكمل حتى الانعطاف الحاد جداً بأمان.

حينما يسير راكب الدراجة، يحاول إبقاء نفسه والدراجة في حالة اتزان دوراني، أي مواجهة محصلة عزم دوراني

صفرية حول مركز كتلتيهما المشترك. محصلة العزم الدوراني ستجعلهما يخضعان لتسارع زاوي فينقلبان. بما أنهما يواجهان عزماً دورانياً احتكاكياً كلما انعطفا، فإن الراكب يوازن ذلك العزم الدوراني بإمالة نفسه و/أو الدراجة نحو داخل المنعطف. وعندها تنتج قوة الأرضية الداعمة للأعلى على العجلات عزماً دورانياً عليهما حول مركز كتلتيهما المشترك ويعاكس ذلك العزم الدوراني الجديد عزم الدوران الاحتكاكي. عندما يكون مجموع هذين العزمين صفرا، فإن الدراجة وراكبها يكونان في حالة اتزان دوراني آمن.

بما أن كلا العزمين الدورانيين المتعاكسين ناتجان من قوى الأرضية المبذولة على العجلات، فيمكننا دمجهم في عزم دوراني واحد؛ يمكننا أولا أن نجمع قوى الاحتكاك والدعم ثم نرى مقدار العزم الدوراني الذي تنتجه تلك القوة الكلية على راكب الدراجة. الذي سنجده بعمل ذلك الدمج هو أن عزم الدوران ينخفض للصفر عندما تدفع الأرضية العجلات باتجاه مركز الكتلة المشترك للدراجة وراكبها مباشرة. كما رأينا في قسم ١,٢، فإن القوة المبذولة مباشرة باتجاه نقطة الارتكاز تنتج عزماً دورانياً صفرياً حول تلك النقطة. للبقاء في حالة اتزان دوراني أثناء تحركه، فإن راكب الدراجة دائماً يضع مركز الكتلة المشترك مباشرة على نفس خط تأثير قوة الأرضية المبذولة على العجلات.





شكل ٦,١,٤: (أ) الدراجة التي تتحرك للأمام على طول خط مستقيم تكون في حالة اتزان دوراني عندما تكون منتصبة تماما. القوة الداعمة من الأرض لا تنتج أي عزم دوراني حول مركز كتلة الدراجة. (ب) الدراجة التي تنعطف نحو اليسار هي في حالة اتزان دوراني عندما تميل لليسار. القوة الداعمة وقوة الاحتكاك بالأرض سوية لا تنتجان عزماً دورانياً حول مركز كتلة الدراجة.

على سبيل المثال، عندما تتحرك الدراجة للأمام على طول خط مستقيم، فإن الراكب يمكنه تجنب محصلة عزم الدوران بإبقاء الدراجة منتصبة. عندما تدفع الأرضية على العجلات رأسياً للأعلى، باتجاه مركز الكتلة المشترك مباشرة (شكل ٦,١,٤ أ). لكن عندما تنعطف الدراجة باتجاه اليسار، يجب على الراكب أن يميل نفسه و/أو الدراجة لليسار للبقاء في حالة الاتزان الدوراني. ذلك لأن كل عجلة في الدراجة المتحركة تواجه ليس فقط قوة داعمة للأعلى، بل أيضا قوة الاحتكاك لليسار والتي تحتاجها للتسارع خلال الانعطاف (شكل ٦,١,٤ ب). بناء على ذلك، فالقوة الكلية التي يبذلها الطريق على الدراجة المنعطفة تتجه للأعلى واليسار. بالميل نحو اليسار بالمقدار الصحيح، يضمن الراكب أن هذه القوة الكلية تتجه مباشرة نحو مركز الكتلة المشترك ولا تبذل أي عزم دوراني حوله (شكل ٧,١,٤).

بعد فترة من الزمن، تصبح إمالة الدراجة خلال الانعطاف تلقائية جداً واعتيادية إلى درجة أنك حتى لا تفكر في الموضوع. ببساطة لا تستطيع ركوب دراجة دون الإمالة عندما تنعطف. علاوة على ذلك، حتى لو أدرت دراجة أو دراجة نارية بحدة بحيث تتزحلق، فإن الإمالة مازالت قادرة على إبقائها بأمان في حالة اتزان دوراني.

ولكن يمكن فقط للعربة غير المستقرة سكونياً أن تميل، لذا فالعربة المستقرة سكونياً يجب أن تعتمد على عزوم الدوران الإرجاعية لإبقائها بالقرب من اتزانها الدوراني. كما رأينا في الدراجات ذات الثلاث عجلات، عزوم الدوران الإرجاعية محدودة ويمكن للعربة أن تفقد توازنها الدوراني أثناء التسارع السريع. سوف تنقلب السيارة أو الشاحنة أو السيارات الرياضية المتوسطة الحجم إذا انعطفت بحدة عالية، وبعضها خصوصاً عرضة لمثل هذه الكوارث. كلما ارتفع مركز كتلة العربة وضاقت قاعدة الدعم، أصبحت عزوم الدوران الإرجاعية أكثر محدودية وزاد سهولة انقلاب السيارة أثناء الانعطاف. من المدهش أن السيارات الرياضية المتوسطة الحجم أكثر عرضة لمثل حوادث الانقلاب هذه، والشاحنات الصغيرة التي عززت لتشبه المقطورات الجرارة هي خطرة حقا. حتى أن بعض السيارات المنتجة وجد أنها غير آمنة بهذا الخصوص.

ويزلي هيث/مؤسسة وكالة ليازون/صور جيتي



شكل ٧,١,٤: حينما يلفّون حول منعطف أثناء السباق، يميل هؤلاء المتسابقون باتجاه داخل المنعطف. هذه الإمالة تمنع الأرضية من إنتاج عزوم دوران تُبذل عليهم وتؤدي لانقلابهم.

تحقق من فهمك # ٣: الاختصار (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

لماذا يميل المتزلج على الثلج باتجاه الانعطاف أثناء انحداره من مرتفع؟

ركوب الدراجات

حتى الآن، ناقشنا فقط الاستقرار. لكن ما أن نتفق على أن الدراجة هي الصورة الراجحة لعربة مفيدة تعمل بالجهد الشخصي، إلا ويجب علينا أن نفهم كيف نجعلها تعمل بهذا الجهد. يمكن أن يدفع الراكب بقدميه

على الأرض، ولكن هذا سيكون غير ملائم وحتى خطراً في السرعات العالية. بدلا من ذلك، نستخدم دواسات قدم لإنتاج عزم دوران على إحدى العجلات. ولكن أي عجلة، وكيف ننتج ذلك العزم الدوراني؟
الإجابة الأصلية كانت تشغيل العجلة الأمامية، باستخدام سواعد مرتبطة مباشرة بمحورها. الساعد هو ببساطة رافعة تبرز من المحور وتنتج عزماً دورانياً على ذلك المحور حينما تدفع طرفها الحر بشكل دائري. كل ساعد في الدراجة له دواسة مركبة في نهايته الحرة حتى تستطيع استخدام قدمك للدفع عليه. بتعلق محور الدراجة بمحامل، فتدور العجلة الأمامية إذا حركت الدواسات. عندها يدفع الاحتكاك بين العجلة الدائرة والأرض الدراجة للأمام.



شكل ٨،١،٤: استخدمت البينيفارثينغ (Pennyfarthing) عجلة أمامية عملاقة مدفوعة مباشرة لتسمح للراكب بالسير بسرعة معقولة دون الحاجة لتشغيل الدواسات بسرعة كبيرة. أتى اسمها من مشابهة عجلاتها لعملتين نقديتين، البنس البريطاني الكبير والفارثنج (farthing) - أي ربع البنس - الصغير.

بالطبع لا يمكنك الحصول على شيء دون مقابل: يدفع احتكاك الأرض أيضاً على العجلة، محاولاً منع دورانها. لهذا يجب أن تستمر في تشغيل الدواسات: فتشغيلك للدواسات يدير العجلة للأمام، بينما احتكاك الأرض يديرها للخلف. عندما يتوازن هاذان العزمان الدورانيان، سوف تسير بسرعة ثابتة.

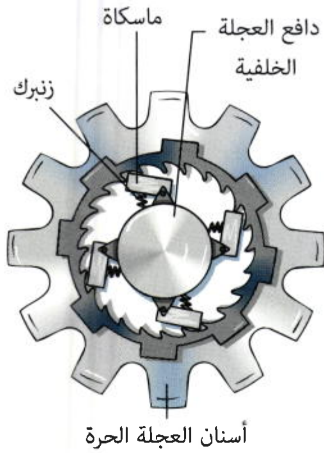
طريقة تشغيل الدواسات هذه مازالت مستخدمة في دراجات الأطفال ذات الثلاث عجلات، لكن لها ثلاثة عوائق. أولا: إن تشغيل الدواسة لتحريك العجلة الأمامية يتداخل مع مهمتها الأخرى: التوجيه. ثانيا: لا يمكنك التوقف عن تشغيل الدواسة؛ إذا كانت الدراجة متحركة فالدواسات تتحرك أيضا. ثالثا، يمكنك أن تنتج عزماً دورانياً أكثر من اللازم على العجلة الأمامية، ولكن في الغالب ستجد صعوبة في تحريك ساقيك بسرعة كافية لمجاراة سرعة الدواسات. عندما تسير على أرض مستوية، ستجد نفسك تشغّل الدواسات بشراسة وتشعر بمقاومة قليلة من الدواسات.
إن مشكلة تشغيل الدواسات بشراسة تدخل في جميع العربات التي تعمل عن طريق تشغيل الدواسات، أي العربات التي تسحب القدرة منك، أنت الراكب، للتغلب على القصور الذاتي، ومقاومة الهواء، وربما ميل المنحدر. أنت توفر تلك القدرة بالقيام بشغل على الدواسات - مقدار معين من الشغل كل ثانية. بما أن الشغل هو حاصل ضرب القوة في المسافة، فيمكنك أن تقوم بنفس الشغل على الدواسات كل ثانية - أي، يمكنك توفير نفس القدرة للعربة - بدفع الدواسات للأسفل بشدة حينما تدور ببطء أو بدفعها للأسفل بلطف حينما تدور بسرعة. ولكن، لأسباب متعلقة بعلم وظائف الأعضاء أكثر من علم الفيزياء، فإن ساقيك أفضل في توفير القدرة عندما تدفع الدواسات للأسفل بشدة متوسطة حينما تدور بسرعة متوسطة.

لسوء الحظ، تدور دواسات الدراجة ذات الثلاث عجلات الاعتيادية بسرعة وبسهولة لدرجة لا تجعلها تستفيد من قدرتك على تشغيل الدواسات. عندما تتحرك الدراجة ذات الثلاث عجلات بسرعة على أرض مستوية، بالكاد تستطيع مجاراة دواساتها، ناهيك عن بذل شغل عليها. الوقت الوحيد الذي تُحسن فيه الدراجة استعمال مقدرتك على توفير قدرة هو عندما تصعد مرتفعاً بسرعة معتدلة؛ عندها فقط تتحرك الدواسات بسرعة متوسطة وتتطلب أن تقوم بدفعها بشدة متوسطة.

إن حلاً مسبقاً لمشكلة تشغيل الدواسات بشراسة كان باستخدام عجلة أمامية عملاقة. في مثل هذه الوضعية، فإن لفة واحدة للعجلة ستمكنك من قطع مسافة كبيرة، بحيث أنك لم تعد تحتاج لتشغيل الدواسات بشراسة أثناء سيرك بسرعة عالية على طول طريق مستوٍ. في نفس الوقت، يبذل احتكاك الأرض عزماً دورانياً أكبر للخلف على العجلة العملاقة، بحيث أنك تحتاج أن تدفع بشدة أكبر على الدواسات للمحافظة على دوران العجلة بثبات. أخيرا، يمكنك الوصول لقمة أدائك على أرض مستوية، بالدفع على الدواسات بشدة متوسطة وهي تدور بسرعة متوسطة. هذا النوع من الدراجات كان موجودا في منتصف القرن التاسع عشر ويسمى بينيفارثينغ (Pennyfarthing) (شكل ٨،١،٤). لكن كان تشغيل الدواسات لا يزال يتدخل في التوجيه ولم يكن يمكنك التوقف عن تشغيل الدواسات أثناء تحرك الدراجة. إضافة لذلك، كان لهذه الدراجة مشكلة أخرى: لم يكن يمكنك الدفع بقدميك بشدة كافية لإبقاء عجلتها الأمامية تدور بثبات صعوداً في المنحدرات الممتدة.

حلّت هذه المشاكل بإزالة السواعد من محور العجلة الأمامية وباستخدام طريقة دفع غير مباشرة لنقل القدرة للعجلة الخلفية. باستخدام أسنان عجلة مسننة وسلسلة على شكل حلقة، يسمح ذلك الدفع غير المباشر للدواسات والعجلات أن تدور بمعدلات مختلفة. هذا التغير يمكّنك من استخدام الفائدة الميكانيكية لاختيار الطريقة التي توفر بها القدرة لتشغيل الدراجة: سواء أن تبذل قوى كبيرة على دواسات بطيئة الحركة أو قوى صغيرة على دواسات سريعة الحركة، أو مثالياً، قوى متوسطة على دواسات متحركة بسرعة متوسطة. سواء كنت تنطلق بسرعة في طريق مستوٍ أو تكدح ببطء صعوداً تلة، فإنه يمكنك دائماً أن تجد عيار دفع أو «ترساً» يمكّنك من توفير قدرتك القصوى بارتياح.

أخيرا، تُحل مشكلة تشغيل الدواسة بدون توقف بدمج دافع وحيد الاتجاه أو عجلة حرة في أقبُّ العجلة الخلفية. تسمح هذه العجلة الحرة (شكل ٩,١,٤) للعجلة الخلفية بالدوران بحرية في اتجاه واحد بحيث يمكنك أن تتوقف عن تشغيل الدواسات أثناء سيرك للأمام. تظهر دراجة حديثة بهذه التحسينات في شكل ١٠,١,٤.



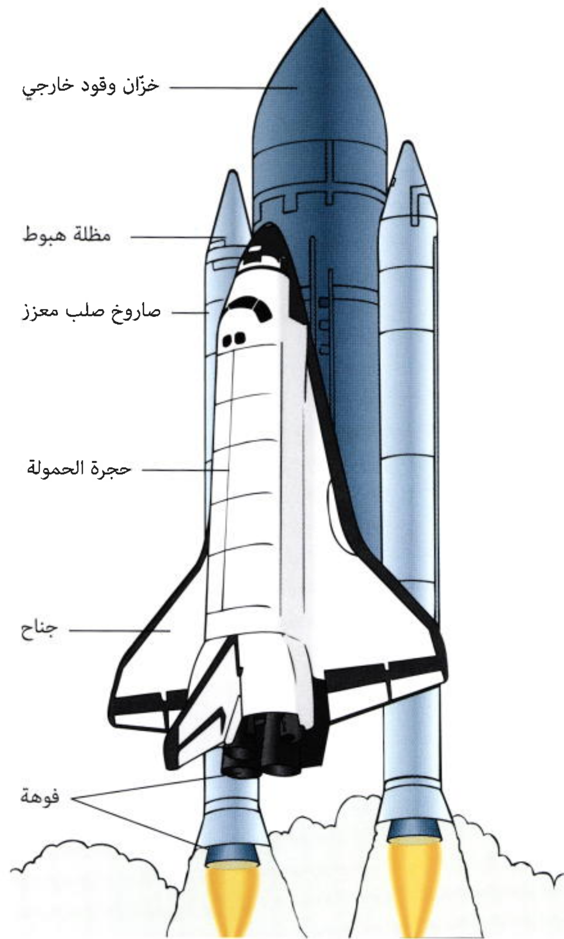
شكل ٩,١,٤: السقّاطة في العجلة الحرة بالدراجة. إذا كان الدوران النسبي للجزئين الداخلي والخارجي في الاتجاه الصحيح، فإن الماسكات تحول العزم الدوراني من الجزء الخارجي للجزء الداخلي. إذا انعكس اتجاه الدوران النسبي، تضغط الماسكات على الزنابك وتقفز على طول الأسنان الداخلية للجزء الخارجي. لا ينتقل أي عزم دوراني.

تحقق من فهمك # ٤: الأكبر ليس دائماً الأفضل (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

لماذا يكون صعود منحدر بركوب البينيفارثينج صعباً جداً ؟



شكل ١٠,١,٤: دراجة حديثة. تُدفع العجلة الخلفية عن طريق سلسلة تسمح للراكب بتغيير الفائدة الميكانيكية بين الدواسات والعجلة الخلفية. العجلة الحرة في أقبّ العجلة الخلفية تسمح لتلك العجلة بالدوران بحرية في اتجاه واحد. تسمح هذه الحركة الحرة للدراجة بالتحرك للأمام، حتى عندما تكون الدواسات ساكنة.



٤-٢ الصواريخ والسفر في الفضاء

على الرغم من تعقيدات مركبات الفضاء الحديثة، إلا أن الصاروخ يعد أحد أبسط الآلات جميعاً. يستخدم الصاروخ مبدأ أساسياً جداً وهو أن لكل فعل رد فعل. يندفع الصاروخ للأمام بدفع مواد خارج ذيله. ولكن على الرغم من بساطته، فإن الناس قد طوروا الصاروخ من أفضل لأفضل باستمرار لأكثر من سبعمائة عام. تستخدم الصواريخ الآن لمهام متعددة مثل اكتشاف الفضاء، والتسلح، وعمليات الإنقاذ، والترفيه.

أسئلة للتفكير

ما الذي يدفع الصاروخ إلى الأمام؟ كيف يمكن للصاروخ أن يعمل في الفضاء، حيث يبدو أنه لا يوجد أي شيء يدفع عليه؟ لماذا الصواريخ الحديثة لها فوهة عادم فاخرة؟ ما هي السرعة القصوى التي يمكن أن يصل إليها الصاروخ؟ لماذا تتحرك الأقمار الصناعية بشكل لا نهائي حول الأرض؟ ما هو شكل المسار الذي يتبعه الصاروخ أثناء سفره من كوكب لكوكب آخر؟

تجارب يمكن القيام بها

مع أن قضاء جزء من النهار في إطلاق نماذج من الصواريخ (متوفرة في مخازن اللعب والهوايات) سيكون أفضل مقدمة لهذا القسم، إلا أن لعبة البالون ستفي بالغرض. انفخ البالون واتركه. سوف يتحرك حول الحجرة. ما الذي يدفع البالون للأمام؟ هل يشترك الهواء في الغرفة والجدران في الدفع أم أن البالون يندفع بفعل قذف الغاز من خلال فتحته؟ كيف يمكنك التحقق من إجابتك على السؤال السابق؟

(أ)



الرجل والحذاء
(حالة السكون)

(ب)



الرجل والحذاء
(بعد الحذف)

شكل ١,٢,٤ : الرجل الذي يمسك بحذاء حينما يقف ساكناً على الجليد له كمية حركة مساوية للصفر. عندما يقذف بالحذاء لليمين، يكون للحذاء كمية حركة لليمين والرجل له كمية حركة لليسار. كمية الحركة الكلية للرجل والحذاء ما زال صفرا. بما أن الرجل له كتلة أكبر بكثير من كتلة الحذاء، فيتحرك الحذاء بسرعة أكبر من سرعة الرجل.

دفع الصاروخ

من بين ميزات الصاروخ الأكثر روعة مقدرته على دفع نفسه للأمام حتى في العزلة التامة في الفضاء والسرعات المبهرة التي يمكن أن يحققها بذلك الدفع. بطريقة ما يستطيع الصاروخ أن يدفع نفسه للأمام دون أي مساعدة خارجية وأن يستخدم ذلك الدفع الأمامي ليتسارع، على ما يبدو، دون حدود.

بالطبع، لا يستطيع الصاروخ أن يدفع نفسه للأمام حقيقة، تماما مثل عدم استطاعتك أن ترفع نفسك باستخدام حذائك، وأيضا لا يمكنه التسارع للأبد. في الواقع، يحصل الصاروخ على قوة للأمام، قوة دفع، بالدفع ضد مخزن وقوده المحدود، وعندما ينفد ذلك الوقود، يتوقف عن التسارع. لفهم كيف يحصل الصاروخ على دفع من مخزون وقوده، دعنا ننظر كيف ينطبق قانون نيوتن الثالث، الذي يصف الفعل ورد الفعل، على الصواريخ.

تخيل أنك تجلس في منتصف بحيرة متجمدة وسرعتك صفر وليس لديك كمية حركة. إنه يوم دافئ والجليد المبلل زلق جدا. حاول كيفما تحب، لكن يبدو أنك لا تستطيع أن تتحرك على الإطلاق. كيف يمكنك أن تقوم من على الجليد؟

بسبب قصورك الذاتي، فإن الطريقة الوحيدة التي يمكن أن تبدأ التحرك بها هي أن يدفعك شيء. بالتأكيد، يمكنك أن تطلب بيتزا ثم تدفع ضد سيارة التوصيل عندما تصل إليك. لكن بدلا من ذلك تتبّع الأفكار التي ناقشناها في صفحة ٨٥. تخلع حذاءك وتقذفه بأقصى قوة لديك باتجاه الجانب الشرقي للبحيرة (شكل ١,٢,٤). حينما تقذف الحذاء، أنت تبذل قوة عليه بيدك. يتسارع الحذاء ويتجه عبر الجليد.

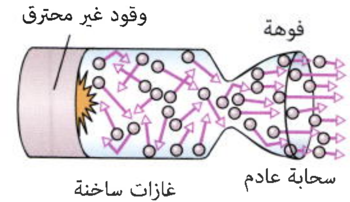
ماذا يحدث لك؟ أنت تتحرك باتجاه الجانب الغربي للبحيرة! أنت تتحرك لأنك عندما دفعت الحذاء باتجاه الجانب الشرقي للبحيرة، فإنه دفعك بنفس القوة باتجاه الجانب الغربي للبحيرة. أثناء العملية، نقلت كمية حركة للحذاء وهو قام بنقل كمية حركة بالاتجاه المعاكس لك. كمية الحركة لم تُنشأ أو تفنى، بل فقط أعيد توزيعها. حتى بعد أن تترك الحذاء، فإن مجموع كميتي حركتكما يظل صفرا. للحذاء كمية حركة في اتجاه ما مساوية لمقدار كمية حركتك في الاتجاه الآخر.

بالطبع، كتلتك أكبر بكثير من كتلة الحذاء، فتتحرك في النهاية بسرعة أقل من سرعته. إن كمية الحركة هي حاصل ضرب الكتلة في السرعة، فكلما كانت كتلة الجسم أكبر قلت السرعة التي يتحصل عليها لنفس مقدار كمية الحركة. ومع ذلك، فقد حققت ما أردت إنجازه: أنت تتزحلق ببطء باتجاه الجانب الغربي للبحيرة.

سرعتك النهائية محدودة لأنك تمكنت فقط من نقل كمية قليلة من كمية الحركة للحذاء، وبالتالي استلمت بالمقابل مقداراً قليلاً من كمية الحركة بالاتجاه المعاكس. لو أنك كنت قادراً على قذف الحذاء أسرع أو لو أنك قذفت صندوقاً كاملاً من الأحذية، لكنت نقلت كمية حركة أكثر ولكنت تتحرك الآن بسرعة أكبر.

بدلاً من قذف الأحذية، كان بالإمكان أن تقوم بشي أفضل وهو قذف جزيئات غاز سريعة جدا. حتى في درجة حرارة الغرفة، تتحرك جزيئات الهواء بسرعة 1800km/h (1100mph) تقريبا. عند تسخين الجزيئات لحوالي2800°C (5000°F)، كما هو الوضع في الوقود السائل لمحرك الصاروخ، فإنها تتحرك ثلاثة أضعاف تلك السرعة تقريبا. إذا قذفت شيئاً ما في اتجاه ما بهذه السرعة، فإنك تستلم كمية حركة كبيرة في الاتجاه الآخر.

هذا ما يقوم به محرك صاروخ تقليدي (شكل ٢,٢,٤). يستخدم الصاروخ تفاعلاً كيميائياً لإنتاج غاز عادم



شكل ٢,٢,٤: صورة جزيئية لما يحدث داخل محرك صاروخ كيميائي. يحرق المحرك وقوده في خزان محصور، ويتدفق غاز العادم خارج فوهة. تحوّل الفوهة الحركة الحرارية العشوائية لجزيئات غاز العادم إلى حركة موجهة بعيدا عن محرك الصاروخ.

ساخناً جداً من وقود محفوظ كلياً داخل الصاروخ نفسه. الذي بدأ كطاقة كامنة في مخزون الوقود الكيميائي يصبح طاقة حرارية في غاز العادم المحترق الساخن. هذه الطاقة الحرارية هي طاقة حركية في الغالب، مختفية في الحركة العشوائية للجزيئات الصغيرة نفسها. توجه فوهة محرك الصاروخ معظم هذه الحركة العشوائية باتجاه واحد، ويحصل المحرك على دفع في الاتجاه المعاكس.

إذا قمت بمشاهدة انطلاق صاروخ كبير، فمن المحتمل أنك لاحظت الفوهات التي على شكل ناقوس والتي يتدفق من خلالها العادم (شكل ٣,٢,٤). تسمح كل فوهة بأن يحصل الصاروخ على أكبر كمية حركة للأمام ممكنة من عادمه بتوجيه ذلك العادم للخلف وتسريعه لأقصى سرعة ممكنة. كما سنرى في الفصل السادس، تسمح الفوهات للغازات بتحويل طاقاتها الداخلية المتعددة إلى طاقة حركية ومثالياً تناسب توجيه وتسريع الغازات. في حالة عادم الصاروخ، أكثر أشكال الفوهات فعالية هو المجمع-المنفرج، والذي يسمى فوهة دي لافال (de Laval)، نسبة للمخترع السويدي، كارل غوستاف دي لافال (انظر ٥[١]) .

لنفهم بالكامل لماذا تركيب هذه الفوهات المعقدة يجعل محرك الصاروخ يعمل بشكل جيد، سنحتاج لفحص فيزياء تدفق الغازات بسرعات تقترب وتتخطى سرعة الصوت. سنواجه بعضاً من هذه القضايا لاحقاً في هذا الكتاب، لكننا حالياً سنكتفي بخلاصة قصيرة.

داخل الصاروخ وقبل فوهة دي لافال، يكون غاز العادم الساخن محصوراً بإحكام وضغطه هائلاً. مثل الغاز في قنينة رذاذ، يتسارع غاز العادم هذا بسرعة خلال الفوهة باتجاه الضغط المنخفض للبيئة الخارجية. ضيق عنق تلك الفوهة يساعد في تسارعه، لحد ما. عندما يصل الغاز لأكثر الأجزاء ضيقاً في الفوهة، فإنه يتحرك بسرعة الصوت وتبدأ خصائصه بالتغير بشكل مثير. لإجبار غاز العادم فوق الصوتي على زيادة تسارعه أكثر، تتوقف الفوهة عن التضييق وتبدأ بالاتساع. يتمدد حجم غاز العادم المحصور بإحكام أثناء تدفقه خلال ذلك الجزء المتسع من شكل الناقوس وبذلك يستعد لدخول البيئة الأكثر انفتاحاً خارج الفوهة.

إن مقدار عرض الطرف المنفرج من فوهة دي لافال اللازم للحصول على أقصى دفع من غاز العادم يعتمد على الوسط المحيط بالفوهة. قرب مستوى البحر، يتدفق غاز العادم إلى الهواء الطبيعي خارج الفوهة فيكون استخدام فوهة دي لافال ضيقة أفضل. في الارتفاعات العالية أو في الفضاء، يتسرب غاز العادم إلى الهواء الأقل كثافة أو إلى الفراغ، لذا فإن استخدام فوهة دي لافال عريضة يكون مناسباً أكثر. في الغالب تسعى الصواريخ لإيجاد حل وسط لأشكال فوهاتها لكي تعمل بشكل جيد في جميع البيئات المحيطة.

في الوقت الذي يصل فيه الغاز لنهاية فوهة دي لافال يكون قد حوّل معظم طاقته الأصلية لطاقة حركية، وسرعته متجهة بعيداً عن الفوهة. في الحقيقة، بما أن الغاز يواصل احتراقه حتى أثناء تدفقه في الفوهة، فإن طاقته الحركية وسرعته تستمر في الازدياد إلى أن تصل لمستويات هائلة. بمساعدة فوهة دي لافال، يترك غاز العادم محرك الصاروخ بسرعة عادم أو سرعة تدفق معاكسة تتراوح بين
10,000 و16,000km/h - (6,000 و10,000mph).

٥[١] إن اختراع كارل غوستاف دي فال، مهندس ومخترع سويدي (١٨٤٥ – ١٩١٣م)، للفوهة المجمعة-المنفرجة سبق التطور الحديث للصواريخ بعدة عقود. لقد اخترع هذه الفوهة كطريقة لزيادة كفاءة التوربينات البخارية ويرجع الفضل له في وضع أسس كل تقنيات التوربينات المستقبلية. يعرف دي لافال أيضا لاختراعه فاصل القشدة من الحليب.

بإذن من ناسا



شكل ٣,٢,٤: فوهات المكوك الفضائي مصممة لتدفع عادم صاروخه للأسفل على شكل سحب طويلة وهّاجة. يدفع الغاز عكسياً فيرفع المكوك صعوداً إلى الفضاء.

حينما يكوّن الصاروخ هذه السحابة من العادم، يدفع الغاز عكسياً ويعطيه كمية حركة عكسية. يكمل الغاز عملية نقل كمية الحركة بدفع الصاروخ للأمام. الفعل ذاته من قذف العادم هو كل ما يتطلب للحصول على دفع أمامي؛ لا يحتاج الصاروخ لأي شيء خارجي يدفع «ضده» وسيعمل جيدا في الفراغ (انظر [٢٥]). عندما يدفع بشدة كافية على عادمه، يستطيع الصاروخ ليس فقط دعم وزنه بل يمكنه أن يتسارع أيضاً للأعلى. يزن مكوك الفضاء حوالي 20,000,000N (4,500,000lbf) عند الانطلاق لكن دفعه حوالي 30,000,000N (6,750,000lbf). هذا يعني أن مكوك الفضاء يمكنه أن يتسارع للأعلى بحوالي نصف مقدار التسارع بسبب الجاذبية! حينما يستهلك المكوك وقوده، بحيث يقل وزنه وكتلته، يمكنه أن يتسارع للأعلى بسرعة أكبر.

معتقدات خاطئة شائعة: الفعل ورد الفعل في الصواريخ

المعتقد الخاطئ:

يحتاج الصاروخ جسماً خارجياً ليرتد من عليه لكي يتمكن من دفع نفسه للأمام.

القرار:

مع أن دفع الصاروخ يتضمن زوجاً من القوى المتساوية والمتعاكسة، الفعل ورد الفعل، إلا أن الصاروخ يدفع عادمه للخلف (الفعل) ويدفع العادم الصاروخ للأمام (رد الفعل). ما ترتطم به سحب العادم، حتى وإن كان لا شيء، لا يُحدث فرقاً في تأثير الدفع.

تحقق من فهمك # ١: الصاروخ المتقدم (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

عندما ينطلق صاروخ من أسفل جناح طائرة حربية، على أي شيء يدفع لكي يتسارع للأمام؟

السرعة القصوى لمركبة فضائية

في وضع السكون على منصة الإطلاق، يتكون الصاروخ أساسا من مركبة فضائية ومخزون من الوقود. بمجرد أن يبدأ محرك الصاروخ بالاشتعال، يتسارع العادم من الوقود المحترق للخلف وتتسارع المركبة الفضائية للأمام. يُستهلك الوقود تدريجياً إلى أن ينفد في نهاية الأمر وتتحرك المركبة الفضائية وحدها. على الرغم من أن الوزن ومقاومة الهواء يؤثران على هذا الوصف، دعنا نهملهما حالياً ونرى ما الذي يحدد سرعة المركبة الفضائية القصوى.

قد يبدو أن السرعة القصوى للمركبة الفضائية محدودة بسرعة عادم الصاروخ. من المدهش أنه لا يوجد مثل هذا الحد. طالما أن الصاروخ يستمر في دفع العادم للخلف، فإنه سيستمر في التسارع للأمام. ولكن، لكي تصل المركبة الفضائية لسرعات عالية جدا، يجب أن يدفع الصاروخ معظم كتلته الابتدائية للخلف كعادم. على سبيل المثال، إذا كانت كتلة الصاروخ الابتدائية هي 90 ٪ وقود (أي، تبدأ بتسعة أجزاء وقود وجزء واحد مركبة فضائية)، فإننا قد نتوقع أن المركبة الفضائية ينتهي بها المطاف أن تتحرك للأمام بحوالي تسعة أضعاف سرعة غاز العادم. على العموم، يبدو أن ذلك التنظيم يحقق قانون حفظ كمية الحركة.

لسوء الحظ، يغالي ذلك التحليل في تقدير سرعة المركبة الفضائية. بما أن الصاروخ ما زال على متنه وقود أثناء تسارعه للأمام، فإن بعضاً من كمية الحركة التي يحصل عليها من عادمه تذهب لوقوده المتبقي بدلا من

[٢٥] في ١٣ يناير عام ١٩٢٠م، نشرت صحيفة النيويورك تايمز افتتاحية تهاجم روبرت قودارد لزعمه أن الصواريخ يمكنها أن تستخدم للسفر في الفضاء. بدعم مالي بسيط من مؤسسة سميثسونيان، أخذ قودارد ريادة ابتكار صواريخ الوقود السائل. بدأت الافتتاحية بـ "ذلك الأستاذ قودارد، بـ 'كرسيه' في كلية كلارك وتشجيع مؤسسة سميثسونيان، لا يعرف العلاقة بين الفعل ورد الفعل، ولا الحاجة لوجود شيء أفضل من الفراغ لترتد من عليه - فالقول بذلك سخف. بالطبع يبدو أنه يفتقر إلى المعرفة التي توزع يومياً في المدارس الثانوية".

المركبة الفضائية.

بما أن ذلك الوقود سيُقذف قريباً من الصاروخ كعادم، فإعطاؤه كمية حركة أمامية ثمينة يعتبر هدراً وينتهي المطاف بالمركبة الفضائية أن تكون لها كمية حركة أقل للأمام. مع أن مجموع كمية الحركة الكلية للمركبة الفضائية والوقود يظل دائماً صفرا، إلا أن نقل كمية الحركة هذه غير المناسبة من العادم إلى الغاز يقلل كلاً من سرعة المركبة الفضائية للأمام ومتوسط سرعة العادم للخلف.

على الرغم من هذه المشكلة إلا أن المركبة الفضائية ما زالت قادرة على السفر بسرعة أكبر من سرعة عادم صاروخها؛ فقط تحتاج لمزيد من الوقود. بإهمال مقاومة الهواء والوزن، فإن سرعة المركبة الفضائية تعطى بمعادلة الصاروخ: (١،٢،٤)

$$\text{سرعة المركبة الفضائية} = \text{سرعة العادم} \cdot \text{لو} \left(\frac{\text{كتلة}_{\text{المركبة}} + \text{كتلة}_{\text{الوقود}}}{\text{كتلة}_{\text{المركبة}}} \right)$$

يمكــن لمركبة الصاروخ الذي يكــون 90 ٪ منه وقوداً عند الانطلاق أن تصل لسرعة هي 2.3 أضعاف سرعة غاز عادمه. إذا استطاع الصاروخ أن يقذف أكثر من 90 ٪ من كتلته الابتدائية كعادم، فيمكن أن تزداد سرعته أكثر.

لكن هناك مشكلة عند محاولة إحراق وقذف جزء كبير من كتلة الصاروخ الأصلية على شكل عادم. من الصعب بناء صاروخ 99.99 ٪ منه وقود و 0.01 ٪ مركبة فضائية. بدلا من ذلك، تستخدم الصواريخ الفضائية عدداً من المراحل المنفصلة، كل مرحلة أصغر بكثير من المرحلة التي تسبقها. بمجرد أن تستهلك المرحلة الأولى وقودها، فإن المرحلة بأكملها تُنبذ ويبدأ صاروخ جديد أصغر بالعمل. بهذا الأسلوب، يتصرف الصاروخ كما لو قذف تقريباً معظم كتلته كعادم صاروخ. بمساعدة المراحل والكثير من الوقود، يمكن للصواريخ أن تسافر فعلياً بسرعة أسرع من سرعات عوادمها وتصل لمدار دورانها حول الأرض أو ما بعد ذلك في المجموعة الشمسية (للتطورات المستمرة في صواريخ المرحلة الواحدة، انظر ۵٣).

تحقق من فهمك # ٢: ليس كل شيء يمكن التخلص منه (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

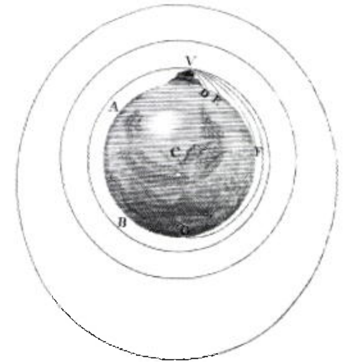
المكوك الفضائي ليس له شكل الصاروخ المستهلك المرحليّ. كيف يمكنه قذف معظم كتلته عند الانطلاق كعادم؟

الدوران حول الأرض

إذا كانت المركبة الفضائية متجهة رأسياً للأعلى عندما استنفدت الوقود، فإنها إما أن تسقط عائدة للأرض أو تغادر الأرض للأبد (المزيد حول ذلك لاحقا). لكن إذا كانت تسير في الأصل أفقياً عندما أطفئ محركها، فإنها قد تجد نفسها تدور سرمدياً حول الأرض. بدون وجود هواء يؤثر عليها، تتبع المركبة الفضائية مساراً محدداً فقط بالقصور الذاتي والجاذبية، وبما أن وزن المركبة الفضائية يتسبب في تسارعها باتجاه مركز الأرض، فإن مسارها يمكنه أن ينحني على شكل حلقة بيضاوية كبيرة حول الأرض.

إن المركبة الفضائية تتبع مداراً حول الأرض. المدار هو مسار يتخذه الجسم أثناء سقوطه سقوطاً حرا حول جسم سماوي. على الرغم من أن المركبة الفضائية تتسارع مباشرة باتجاه مركز الأرض في كل لحظة، إلا أن سرعتها الأفقية الهائلة تمنعها في الواقع من الارتطام بسطح الأرض. نتيجة لذلك، تتجنب المركبة الفضائية الارتطام بالأرض للأبد أثناء سقوطها (شكل ٤،٢،٤). لكي تدور حول الأرض فوق الغلاف الجوي بالضبط، يجب على المركبة الفضائية أن تسير بسرعة هائلة مقدارها 7.9km/s (حوالي 17,800mps) وستدور حول الأرض مرة كل 84 دقيقة.

بإذن من مكتبة نيويورك العامة



شكل ٤،٢،٤ رسم نيوتن لقذيفة مدفع أطلقت أفقياً من قمة جبل شاهق. حينما تزيد سرعة قذيفة المدفع، ستتحرك لمسافة أبعد عن الجبل قبل أن تصطدم بالأرض. في النهاية، ستتحرك قذيفة المدفع بسرعة كبيرة بحيث ينخفض تقوس الأرض تحتها فلا ترتطم بالأرض نهائيا. عندها ستدور قذيفة المدفع حول الأرض.

۵٣ في عام ١٩٨٩م، بدأت الحكومة الأمريكية برنامجاً لتطوير مركبة صاروخية يمكن إعادة استخدامها ويمكن أن تصل لمدار حول الأرض في مرحلة واحدة. أثناء الانطلاق لن يقذف أي شيء سوى الوقود بحيث يمكن للمركبة تكرار سفرها من وإلى مدارها فقط بإعادة تزويدها بالوقود وصيانة قليلة بين الرحلات. إن التحديات التي تواجه هذا البرنامج هائلة. حتى وإن كان وقود هذه المركبات من الهايدروجين السائل والأكسجين، إلا أن تقريبا 90 ٪ من وزن المركبة عند الانطلاق يجب أن يكون وقودا. مع هذا، فالجهود المبذولة لإنتاج مثل هذه المركبات (Single Stage To Orbit SSTO) ذات المرحلة الواحدة وإرسالها للمدار مستمرة.

ولكن، كلما بعُد مدار المركبة الفضائية عن سطح الأرض، زاد الزمن الدوري المداري لها – الزمن الذي تستغرقه لإتمام دورة واحدة. أولاً: بما أن المركبة الفضائية يجب أن تسافر لمسافات أبعد لإتمام الدوران حول المدارات الكبيرة، ستستغرق الرحلة زمناً أطول. ثانياً، يجب أن تسير المركبة الفضائية بسرعة أبطأ حتى تتبع مساراً دائرياً حول الأرض لأن جاذبية الأرض تضعف بزيادة المسافة.

وضح الفصل الأول أن الجاذبية تجذب كل جسم في الكون نحو أي جسم آخر في الكون (انظر ٥). وبشكل خاص، تنجذب الأجسام نحو الأرض. بالقرب من سطح الأرض، يكون وزن الجسم ببساطة هو كتلته مضروبا في 9.8N/kg، أي التسارع بسبب الجاذبية. لكن مع زيادة بعد الجسم عن مركز الكرة الأرضية، فإن التسارع بسبب الجاذبية يقل. معادلة (١,٢,١) هي فقط تقريب، وصالحة للأجسام القريبة من سطح الأرض.

إن صيغة أكثر عمومية هي التي تربط قوى الجاذبية بين جسمين مع كتلتيهما والمسافة التي تفصل بينهما. هذه القوى تساوي ثابت الجاذبية مضروبا في حاصل ضرب الكتلتين، مقسوما على مربع المسافة التي تفصلهما. هذه العلاقة والتي اكتشفها نيوتن وتسمى قانون الجاذبية العامة، يمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

$$\text{القوى} = \frac{\text{ثابت الجاذبية} \times \text{الكتلة}_1 \times \text{الكتلة}_2}{(\text{المسافة بين الجسمين})^2} \quad (٢,٢,٤)$$

ورمزيا:

$$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

وبلغة الحياة اليومية: أقوى ما يكون جذب الجاذبية هو بين الأجسام ذات الكتل الكبيرة ولكنه يقل بسرعة مع المسافة.

لاحظ أن القوة على الكتلة$_1$ تتجه نحو الكتلة$_2$ وأن القوة على الكتلة$_2$ تتجه نحو الكتلة$_1$. هاتان القوتان متساويتان في المقدار لكن متعاكستان في الاتجاه. ثابت الجاذبية من الثوابت الأساسية في الطبيعة، ومقداره المقاس هو $N \cdot m^2/kg^2 \; 6.6720 \times 10^{-11}$.

قانون الجاذبية العامة

كل جسم في الكون يجذب كل جسم آخر في الكون بقوة مساوية لثابت الجاذبية مضروباً في حاصل ضرب الكتلتين، ومقسوماً على مربع المسافة التي تفصل بين الجسمين.

تصف هذه العلاقة جميع التجاذب بفعل الجاذبية، سواء كانت بين كوكبين أو بينك وبين الأرض. إن الموقع الفعّال لكتلة جسم هو مركز كتلته، لذا فإن المسافة المستخدمة في المعادلة (٢,٢,٤) هي المسافة الفاصلة بين مركزي الكتلتين. بالنسبة لمركبة فضائية تدور حول الأرض فوق غلافها الجوي مباشرة، فإن تلك المسافة هي تقريباً نصف قطر الأرض أي 6378km (3964mile). لكن لمركبة فضائية بعيدة جدا عن الغلاف الجوي، فإن المسافة أكبر وقوة الجاذبية أضعف. تواجه هذه المركبة الفضائية تسارعاً بسبب الجاذبية أقل. لإعطائها الوقت الإضافي الذي تحتاجه ليتقوس مسارها حول دائرة، فإن المركبة الفضائية التي تسير على ارتفاعات عالية يجب أن تسير بسرعة أقل من المركبة الفضائية التي تسير على ارتفاعات منخفضة.

هذا الانخفاض في السرعة يفسر الزمن الدوري الأطول لمدارات المركبات الفضائية ذات الارتفاعات العالية. عند ارتفاع 35,900km (22,300mile) فوق سطح الأرض، يصل الزمن الدوري للمدار لأربعة وعشرين ساعة. القمر الصناعي الذي يسير باتجاه الشرق في مثل هذا المدار يدور مع الأرض ويقال بأنه متزامن أرضياً. إذا دار قمر صناعي متزامن أرضياً حول الأرض عند خط الاستواء، فإنه أيضا مستقر أرضياً – يظل دائماً فوق نفس البقعة على سطح الأرض. مثل هذه الوضعية الثابتة تكون مفيدة في الأقمار الصناعية المستخدمة في الاتصالات والطقس.

٥ أثبت الفيزيائي البريطاني هنري كافنديش (١٧٣١-١٨١٠م) أن الأجرام السماوية تبذل قوى جذب على بعضها البعض. قاست تجربته التي قام بها في عام ١٧٩٨م القوى الصغيرة جدا التي يبذلها كرتان معدنيتان على بعضهما البعض، باستخدام ميزان التواء حساس جدا. بمقارنة القوى بين الكرتين بتلك التي بين الأرض وبين الكرتين ذاتها (أوزانها)، استطاع كافيندش أن يستنتج كتلة الأرض.

ليست جميع المدارات دائرية. إن مدارات بعض المركبات الفضائية بيضاوية الشكل، بحيث تتفاوت ارتفاعاتها للأعلى وللأسفل مرة في كل دورة. في نقطة الأوج، أي أقصى مسافة من مركز الأرض، تسير المركبة الفضائية ببطء نسبياً لأنها قد حولت بعضاً من طاقتها الحركية لطاقة جذب كامنة. في نقطة الحضيض، أي أقصر مسافة من مركز الأرض، تسير المركبة الفضائية بسرعة نسبياً لأنها قد حولت بعضاً من طاقة جذبها الكامنة لطاقة حركية. بالطبع، يجب أن لا تجلب نقطة الحضيض المركبة الفضائية داخل الغلاف الجوي للأرض وإلا ستتحطم.

يمكن لمدار مركبة فضائية أن يكون قطعاً زائداً أيضاً. إذا كانت المركبة الفضائية تسير بسرعة عالية، لن تتمكن الأرض من حني مدارها في حلقة مغلقة وستنساق المركبة الفضائية بين الكواكب في الفضاء. فمسار المركبة الفضائية بالقرب من الأرض هو إذاً قطع زائد. تتبع المركبة الفضائية هذا المسار القطع الزائد مرة واحدة فقط ثم تغادر الأرض للأبد.

في العادة تدخل المركبة الفضائية مدار قطع زائد بإطلاق محرك صاروخها. تبدأ المركبة الفضائية بمدار بيضاوي حول الأرض وتستخدم محرك صاروخها لتزيد من طاقتها الحركية. تتخذ المركبة الفضائية بعد ذلك مساراً مقوّساً مبتعدة عن الأرض وتتحول طاقتها الحركية تدريجياً لطاقة جذب كامنة. لكن تضعف جاذبية الأرض مع زيادة المسافة وتقترب طاقة الجذب الكامنة للمركبة الفضائية ببطء من قيمة قصوى حتى حين تصبح مسافتها من الأرض لا نهائية. إذا كان للمركبة الفضائية طاقة أكبر من الطاقة الحركية الكافية لإيصالها لقيمة طاقة الجذب الكامنة القصوى تلك، فإنها ستكون قادرة على الهروب بالكامل من جاذبية الأرض.

إن السرعة التي تحتاجها المركبة الفضائية لتفلت من جاذبية الأرض تسمى سرعة الإفلات. تعتمد سرعة الإفلات هذه على ارتفاع المركبة الفضائية وهي حوالي 11.2km/s (25,000mph) قرب سطح الأرض. المركبة الفضائية التي تسير بسرعة أكبر من سرعة الإفلات تتبع مسار قطع زائد وتتجه نـحو الكواكب الأخرى أو ما بعدها.

معتقدات خاطئة شائعة: رواد الفضاء و«انعدام الوزن»

المعتقد الخاطئ:

رائدة الفضاء التي تدور حول الأرض تكون بعيدة جداً عن الأرض بحيث لا تستشعر الجاذبية وتكون حقاً بلا وزن.

القرار:

إن رائدة الفضاء ما زالت قريبة من سطح الأرض بحيث تستشعر معظم وزنها الأرضي الكامل. تشعر بانعدام الوزن فقط لأنها تسقط سقوطاً حرا.

تحقق من فهمك #٣: تسريع الشهر القمري

(للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

يدور القمر حول الأرض كل 27.3 يوماً، على مسافة قدرها 384,400km من مركز كتلة الأرض. لكي يدور القمر في زمن أقل، كيف يجب أن تتغير مسافته من الأرض؟

دقق في أرقامك # ١: سيارات جذابة

(للإجابة، انظر صفحة ١٣١)

ما مقدار القوة التي تبذلها سيارة كتلتها 1000kg على سيارة مماثلة تبعد عنها 10m؟

الدوران حول الشمس: قوانين كيبلر

بمجرد أن تفلت المركبة الفضائية من جاذبية الأرض وتطفئ محرك صاروخها، تتصرف المركبة الفضائية مثل كوكب صغير وتدور حول الشمس. إذا راقبتها بصبر عند سيرها وقارنت حركتها المدارية مع حركة الكواكب نفسها، قد تبدأ بملاحظة ثلاث ميزات كونية لهذه المدارات الشمسية كلها. هذه الميزات لاحظها بدءاً الفلكي الألماني يوهانز كيبلر (١٥٧١-١٦٣٠) من خلال تحليله الدقيق لبيانات المشاهدة الشاملة التي جمعها الفلكي الدنماركي تايكو براهي. هذه السلوكيات المدارية الثلاثة تعرف بقوانين كيبلر.

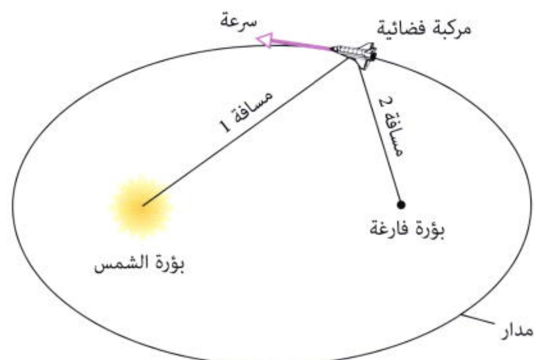
قانون كيبلر الأول: مألوف لنا من قبل عند فحصنا لمدارات الأرض. يصف هذا القانون شكل حلقة مدار المركبة الفضائية حول الشمس: الشكل هو قطع ناقص، بحيث تقع الشمس عند إحدى بؤرتيه (شكل ٥,٢,٤). القطع الناقص ليس شكلا بيضاوياً عشوائياً؛ بل هو منحنى مستوٍ ببؤرتين وله قانون ينص على أن كل نقطة على المنحنى لها نفس مجموع المسافات إلى البؤرتين. في هذه الحالة، تشغل الشمس إحدى هذه البؤرتين والبؤرة الثانية خالية. إذا جمعت المسافة من المركبة الفضائية إلى الشمس مع المسافة من المركبة الفضائية للبؤرة الخالية، فإن هذا المجموع سيظل ثابتاً أثناء دوران المركبة الفضائية حول الشمس. المدار الدائري حول الشمس هو حالة خاصة من قطع ناقص بسيط؛ تتطابق بؤرتاه وتحتل الشمس كليهما.

أدرك كيبلر أن كل جسم يدور حول الشمس يتبع مثل هذه المسارات القطع ناقصة. تتحرك الكواكب متبعة قطعاً ناقصاً قريباً من الشكل الدائري بينما تسير المذنبات في مدارات قطع ناقص مطولة جدا. إن مدار مركبتنا الفضائية يمكن أن يكون دائرياً أو مطولا، ويعتمد ذلك على موقعها وسرعتها عندما توقف محركها عن الانطلاق. للوصول لكوكب آخر، يجب أن يتداخل المدار الشمسي للمركبة الفضائية ومدار الكوكب الذي نريد الوصول إليه ويجب أن يصل الكوكب والمركبة الفضائية لنقطة التداخل في نفس الوقت. من الواضح أن السفر من كوكب لآخر هو عمل صعب.

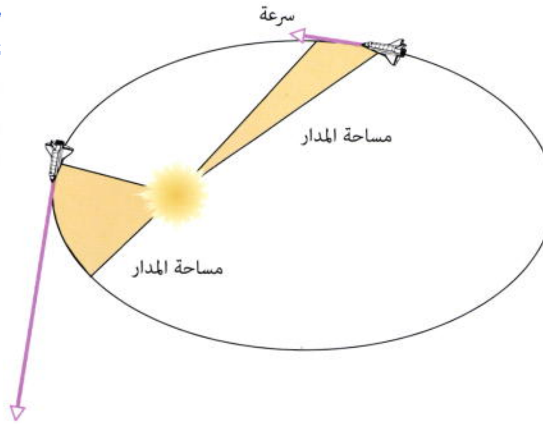
أدرك نيوتن لاحقاً أن هذه المدارات ذات شكل القطع الناقص هي نتيجة مباشرة لقانون الجاذبية العامة (معادلة ٢,٢,٤) وعلاقة التربيع العكسي بين القوة والمسافة (القوة α ١/المسافة^{٢}). أي علاقة أخرى بين القوة والمسافة ستنتج مسارات منحنية لا تنغلق على نفسها على الإطلاق، ناهيك عن تشكيل مدارات حلقية قطع ناقص. حينما تشاهد المركبة الفضائية وهي تتبع مدار القطع الناقص حول الشمس، فأنت تشهد عرضاً رائعاً لقانون الجاذبية العامة.

قانون كيبلر الأول: المدارات

تتحرك جميع الكواكب في مدارات قطع ناقصة، مع وجود الشمس في إحدى بؤرتي القطع الناقص.



شكل ٥,٢,٤: إن مدار المركبة الفضائية حول الشمس هو قطع ناقص، وتحتل الشمس إحدى بؤرتيه والبؤرة الأخرى فارغة. مجموع المسافة ١ والمسافة ٢ ثابت لجميع النقاط التي على منحنى القطع الناقص.



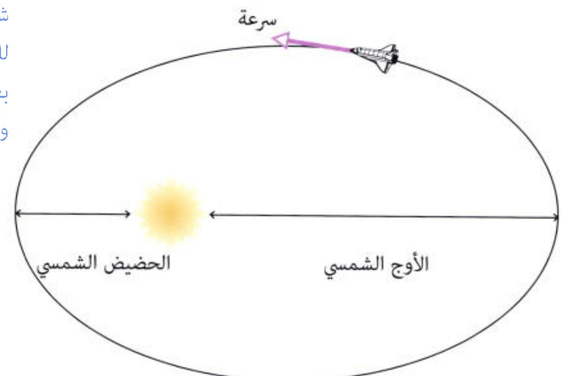
شكل ٦,٢,٤ : المركبة الفضائية التي تدور في المدار تغطي نفس المساحة المدارية كل ثانية، بغض النظر عن التغير في بعدها عن الشمس. هذا المسح الثابت هو نتيجة ثبات كمية الحركة الزاوية للمركبة الفضائية حول الشمس.

يصف قانون كيبلر الثاني المساحات التي يقطعها خط ممتد من الشمس إلى المركبة الفضائية: يغطي ذلك الخط مساحات متساوية في أزمنة متساوية (شكل ٦,٢,٤). بغض النظر عن كون مدار المركبة الفضائية دائرياً أو مطولاً، أو عن موقع المركبة الفضائية في ذلك المدار، فإن المساحات التي يغطيها ذلك الخط المتحرك في كل ثانية هي دائماً متساوية.

قانون كيبلر الثاني: المساحات

يغطي الخط الممتد من الشمس إلى كوكب مساحات متساوية في أزمنة متساوية.

توضح هذه الملاحظة قانوناً فيزيائياً آخر: قانون حفظ كمية الحركة الزاوية. بما أن جاذبية الشمس تجذب المركبة الفضائية مباشرة نحو الشمس، فإنها لا تبذل أي عزم دوراني على المركبة الفضائية حول الشمس وكمية الحركة الزاوية للمركبة الفضائية حول الشمس ثابتة. من الملفت للنظر أن المعدل الذي يغطي به هذا الخط المساحات يتناسب مع كمية الحركة الزاوية للمركبة الفضائية، لذا فثبات تلك التغطية يوضح ثبات كمية الحركة الزاوية للمركبة الفضائية.
يصف قانون كيبلر الثالث الزمن الدوري المداري للمركبة الفضائية حول الشمس: مربع زمنها الدوري المداري يتناسب مع مكعب متوسط بعدها عن الشمس، أي أن متوسط بعد حضيضها الشمسي (أقصر مسافة للشمس، شكل ٧,٢,٤) و بعد أوجها الشمسي (أبعد مسافة عن الشمس). يمكن اشتقاق هذه العلاقة من قانون الجاذبية العامة (معادلة ٢,٢,٤)، والمعادلات التي تصف التسارع المركزي (مثل معادلة ١,٣,٣)، وقانون نيوتن الثاني (معادلة ٢,١,١).



شكل ٧,٢,٤: مربع الزمن الدوري المداري للمركبة الفضائية يتناسب مع مكعب متوسط بعدها عن الشمس - أي متوسط حضيضها وأوجها الشمسي.

قانون كيبلر الثالث: الزمن الدوري

مربع الزمن الدوري المداري لكوكب يتناسب مع مكعب متوسط بعد ذلك الكوكب عن الشمس.

تحقق من فهمك #٤: خارج الدورة (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

غادرت مركبتك الفضائية الأرض للتو وهي الآن تدور حول الشمس بشكل مستقل. مدارها المطول له نفس متوسط البعد عن الشمس مثل مدار الأرض، لكن أوجها الشمسي ضعف حضيضها الشمسي. قارن بين سرعاتها عند الأوج وعند الحضيض. هل ستلتقي بالأرض مرة أخرى؟

السفر للنجوم: النسبية الخاصة

على الرغم من التحديات الهائلة، قد يكون من الممكن يوماً ما للمركبة الفضائية المأهولة أن تغامر بعيداً عن النظام الشمسي وتسافر للنجوم. يتضمن ذلك قطع مسافات شاسعة والطريقة الوحيدة لقطعها خلال عمر رائد الفضاء هي أن يتحرك بسرعات عظيمة، سرعات قريبة لسرعة الضوء نفسه.

إذا تمكنت المركبات الفضائية من بلوغ مثل هذه السرعات الهائلة يوماً ما، ستجد أن قوانين الحركة الأساسية، القوانين الغاليلية والنيوتينية التي قمنا بتعلمها إلى الآن ناقصة. على الرغم من دقتها في السرعات المعتادة، فإن هذه القوانين تتعثر بالقرب من سرعة الضوء (بالضبط 299,792,458m/s). يتبين أن هذه القوانين هي تقريب عند السرعات المنخفضة لقوانين الحركة الأكثر دقة التي طوّرها أينشتاين في عام ١٩٠٥م (انظر ٥). بناء على الملاحظة بأن الضوء يسير دائما بسرعة ثابتة، بغض النظر عن الإطار المرجعي القصوري للمشاهد، فإن قوانين الحركة النسبية هذه دقيقة عند أي سرعة. هي جزء من النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، والتي هي إطار للمفاهيم التي تصف المكان، والزمان، و الحركة في غياب الجاذبية.

٥ في عام ١٩٠٥م، حينما كان ألبرت أينشتاين (فيزيائي سويسري ثم أمريكي، وألماني المولد، ١٨٧٩ – ١٩٥٥م) يعمل كفاحص لبراءات الاختراعات في برن، نشر أربع أوراق علمية مبتكرة في ثلاثة مجالات مختلفة من مجالات الفيزياء. كان هذا العام لطالب الدكتوراة الألماني ذي الستة والعشرين سنة عاماً فريداً حقا. على الرغم من أن أينشتاين كثيراً ما يُصوَّر على أنه رجل مسن، ذو شعر هائج، إلا أن معظم إسهاماته المهمة للعلوم كانت عندما كان شاباً حيوياً متزوجاً للتو من زوجته الأولى قبل عامين من هذا التاريخ.

رأينا في قسم ١-١ أن المشاهدين في الأطر المرجعية القصورية المختلفة يمكنهم أن يختلفوا حول موقع جسم وسرعته. تقر النظرية النسبية الخاصة أن هؤلاء المشاهدين يمكنهم أن يختلفوا أيضا حول المسافة والزمن اللذين يفصلان بين حدثين. وأكثر تعميما، فالمشاهدان القصوريان اللذان يتحركان بالنسبة لبعضهما البعض يدركان المكان والزمان بشكل مختلف نوعا ما. إذا كانا يتحركان بسرعات معتادة، فذلك الاختلاف في الإدراك يكون قابلاً للإهمال وتكون قوانين الحركة النيوتينية تقريباً كاملة. لكن إذا تحركا بالنسبة لبعضهما بسرعة هي جزء كبير من سرعة الضوء، فسيدركان المكان والزمان بشكل مختلف تماما. في تلك الحالة، يفشل التقريب النيوتوني ويتطلب استخدام قوانين النسبية الكاملة.

للنظرية النسبية تداعيات عديدة في الرحلات الفضائية ذات السرعات العالية، لكن سنركز على كيفية تغيير النسبية لكميتين محفوظتين مألوفتين: كمية الحركة والطاقة. في السرعات المنخفضة، تأخذ كمية حركة مركبتنا الفضائية قيمتها النيوتينية المعتادة: الكتلة مضروبة في السرعة (معادلة ١,٣,٢). لكن مع زيادة السرعة، يدخل معامل نسبي جديد في الصورة: (١ – السرعة^{٢} \ سرعة الضوء^{٢})$^{٢\١}$. كمية الحركة النسبية هي حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته مضروباً في ذلك المعامل. يمكن كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية:

$$\text{كمية الحركة النسبية} = \frac{\text{الكتلة} \times \text{السرعة}}{\sqrt{\text{١ - السرعة}^{٢} \text{ \textbackslash\ سرعة الضوء}^{٢}}} \qquad (٣,٢,٤)$$

ورمزيا:

$$p = \frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

وفي لغة العامة: حتى تصل مركبة فضائية لسرعة الضوء، يجب أن تكون كمية حركتها لا نهائية.

في السرعات المعتادة، يساوي المعامل النسبي 1 تقريباً فتقترب تلك العلاقة النسبية بشكل جميل من العلاقة النيوتينية. لكن مع زيادة سرعة المركبة الفضائية لحد كبير من سرعة الضوء ذاته، فإن المعامل النسبي يفسد التناسب البسيط بين كمية الحركة والسرعة. عندها تزداد كمية الحركة بشكل أسرع من ازدياد السرعة. إحدى نتائج هذا التغير هي أنه يصبح من المستحيل الوصول لسرعة الضوء، ناهيك عن تجاوزها. حتى وإن زاد دفع المركبة الفضائية من كمية الحركة الأمامية بمعدل ثابت، فإن سرعتها ستزيد بمعدل أقل. إنها ستقترب من سرعة الضوء ولكن لن تصل إليها أبدا.

يحدث تغير مماثل لطاقة المركبة الفضائية حينما تقترب من سرعة الضوء. في السرعات المنخفضة، تأخذ الطاقة الحركية لمركبتنا الفضائية المعزولة مقدارها النيوتوني المعتاد: نصف كتلتها مضروبة في مربع سرعتها (معادلة ١,٢,٢). ولكن في السرعات العالية، يجب أن نبدأ باستخدام الطاقة النسبية. الطاقة النسبية هي حاصل ضرب كتلة الجسم في مربع سرعة الضوء في المعامل النسبي. هذه العلاقة يمكن أن تكتب كمعادلة لفظية: (٤,٣,٤)

$$\text{الطاقة النسبية} = \frac{\text{الكتلة} \times \text{سرعة الضوء}^{2}}{\sqrt{1 - \text{السرعة}^{2} \setminus \text{سرعة الضوء}^{2}}}$$

ورمزيا:

$$p = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

وفي لغة العامة: تبدأ المركبة الفضائية بطاقة سكون وتكبر طاقتها نحو اللانهاية حينما تقترب سرعتها من سرعة الضوء.

في السرعات المعتادة، يمكن تقريب الطاقة النسبية للمركبة الفضائية كالتالي:

$$\text{الطاقة النسبية} = (\text{السرعة})^{2} \times \text{الكتلة} + \frac{1}{2} \times \text{الكتلة} \times (\text{السرعة})^{2}$$

تظهر الطاقة الحركية النيوتونية المعتادة في الطرف الأيمن في هذا التقريب، ولكن على يسارها طاقة جديدة لم نرها من قبل. تسمى هذه الطاقة طاقة السكون، وهي موجودة حتى وإن كانت المركبة الفضائية ساكنة. بما أن طاقة السكون ثابتة، فهي لا تؤثر على حركة السرعات المنخفضة وتم التغاضي عنها في قوانين نيوتن. ولكن هذه الطاقة المرتبطة بالكتلة ذاتها (تكتب رمزيا $E = mc^2$) لها تداعيات وبالتأكيد تعد من أشهر مميزات النظرية النسبية الخاصة.

تحقق من فهمك # ٥: قوارب السحب الكونية (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

يبذل قارب سحب كوني قوة ثابتة للأمام على مركبة فضائية تسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء. على الرغم من أن القوة ثابتة، إلا أن المركبة الفضائية تزداد سرعتها بمعدل أقل. لماذا؟

إن الصورة النسبية للطاقة لها معنيان ضمنيان لمركبتنا الفضائية. أولا: تزداد طاقة المركبة الفضائية بسرعة عند اقترابها من سرعة الضوء بحيث لا يمكنها الوصول إلى تلك السرعة. ثانيا: مخزون طاقة المركبة الفضائية الابتدائي قبل الانطلاق مرتبط بكتلتها الابتدائية. إن كون الكتلة والطاقة وثيقتي الصلة ببعضهما هو أمر سنعود له في الفصل السادس عشر.

دقق في أرقامك # ٢: حد السرعة الحقيقي (للإجابة، انظر صفحة ١٣١)

تمر مركبة فضائية بالقرب من قاعدتك الكوكبية بسرعة مساوية لنصف سرعة الضوء. باستخدام أجهزة خاصة، تقوم بنقل كمية حركة كافية تماما إلى تلك المركبة الفضائية لتضاعف كمية حركتها للأمام. ما هي سرعة حركتها الآن؟

دقق في أرقامك # ٣: إنها قوية (للإجابة، انظر صفحة ١٣١)

إن سرعة مركبة فضائية صغيرة كتلتها 1kg هي 4/3 من سرعة الضوء. ما هي طاقتها النسبية وما هي نسبة طاقة السكون لتلك الطاقة؟

زيارة النجوم: النسبية العامة

في أثناء رحلاتها بالقرب من النجوم والأجرام السماوية الهائلة، من المحتمل أن تصادف مركبتنا الفضائية مفاجأة أخرى: أن الصورة النيوتونية للجاذبية هي تقريب أيضا. بالقرب من أجسام كبيرة وكثيفة جدا، لا يعود قانون نيوتن للجاذبية العامة قادراً على وصف الجاذبية بدقة. بدلاً من ذلك، يتطلب فهم الجاذبية إطار مفاهيم جديداً قدمه أينشتاين لأول مرة عام ١٩١٦، وهو النظرية النسبية العامة.

هذا الإطار الجديد مستند على الملاحظة أنك لا تستطيع التمييز بين الجاذبية للأسفل والتسارع للأعلى. كما رأينا في قسم ٣-٣، الشعور بهما متماثل تماما. على سبيل المثال، إذا شعرت أنك ثقيل حينما تقف داخل مركبة فضائية مغلقة، لا يمكن أن تكون متأكداً هل تشعر بوزن بسبب الجاذبية للأسفل أم بالتسارع نتيجة التسارع للأعلى. في الواقع، لا تستطيع أجهزة المركبة الفضائية العلمية مساعدتك لأنها أيضا لا تستطيع التمييز بين تأثيرات الجاذبية وتأثيرات التسارع.

في قلب هذه المشكلة يقع مفهوم الكتلة. إلى الآن، قد رأينا الكتلة تلعب دورين مختلفين ظاهرياً والتي يمكن أن نشير إليهما بكتلة الجاذبية وكتلة القصور الذاتي. عندما تشعر بوزن، فإن كتلة الجاذبية الخاصة بك تعمل سوية مع الجاذبية لتجعلك تشعر بثقل.

عندما تواجه إحساساً بالتسارع، فإن كتلة القصور الذاتي الخاصة بك تعمل سوية مع التسارع لتجعلك تشعر بثقل. ولكن بالرغم من أدوارهما المختلفة، يبدو أن هاتين الكتلتين مترابطتان. بدون استثناء، فإن الجسم الذي له كتلة قصور ذاتي كبيرة وبالتالي يصعب هزّه له أيضا كتلة جاذبية كبيرة وبالتالي يصعب دعمه ضد الجاذبية. في الحقيقة، تبدو الكتلتان أنهما نفس الشيء. هذه الملاحظة قادت أينشتاين لاقتراح مبدأ التكافؤ: أن هاتين الكتلتين، كتلة الجاذبية وكتلة القصور الذاتي، في الحقيقة متماثلة وبالتالي لا يمكن القيام بأي تجربة داخل المركبة الفضائية تميّز بين السقوط الحر وانعدام الجاذبية. تستند النظرية النسبية العامة على مبدأ التكافؤ هذا.

طالما بقت مركبتك الفضائية في مناطق الجاذبية الضعيفة، فإن قانون نيوتن للجاذبية العامة سيصف حركتها بشكل كافٍ. ولكن في أقصى نهايتي الجاذبية تصبح النظرية النسبية العامة ضرورية. تلك النظرية تصف كوناً تشوه فيه الأجسام الضخمة بناء المكان والزمان القريب منها، والذي تنتج فيه الأجسام الضخمة تشوهات ضخمة. أحد التنبوءات المذهلة لهذه النظرية هو وجود أجسام غريبة من ناحية تشويهها جذبياً للمكان والزمان القريب منها بحيث تصبح ثقوباً سوداء - أسطح كروية أو شبه كروية لا ينفذ حتى الضوء منها. لقد تم اكتشاف عدد من الثقوب السوداء، منها ثقب أسود كبير هائل في مركز مجرتنا. قد تريد تجنب هذه الثقوب.

تحقق من فهمك # ٦: تائه في الفضاء (للإجابة، انظر صفحة ١٣٠)

استيقظت على متن مركبتك الفضائية الصغيرة لتكتشف أنك قد كنت نائماً عشرين عاماً تقريباً وأن طاقم المركبة قد اختفوا. النوافذ مغلقة وليس لديك أي فكرة عن موقع مركبتك الفضائية أو ماذا تعمل. تدرك أنك تشعر بجذب باتجاه أرضية المركبة الفضائية. هل أنت تشعر بوزن أم إحساس بالتسارع؟

خاتمة الفصل الرابع

ناقش هذا الفصل المفاهيم الفيزيائية خلف نوعين من الآلات. في قسم الدراجات: درسنا مفهوم الاستقرار الحركي، حيث الجسم الذي يسقط عند سكونه يصبح مستقراً بشكل رائع عند تحركه. كما رأينا كيف أن الحاجة للفائدة الميكانيكية بين الدواسات والعجلات قادت إلى تطوير الدراجات الحديثة المتعددة السرعات.

في قسم الصواريخ: درسنا الطرق التي تدفع بها قوى رد الفعل الصواريخ للأمام. وجدنا أن السرعة القصوى للصاروخ غير محدودة بسرعة العادم، فتسمح له برفع نفسه إلى مدار حول الأرض. تعلمنا أيضا أن الجاذبية تضعف حينما تزداد المسافة بين جسمين متجاذبين، فتجعل من الممكن لمركبة فضائية أن تتحرر من جاذبية الأرض وتبدأ بالدوران حول الشمس. أخيرا، أخذنا نظرة سريعة في الفيزياء الغريبة التي ستواجهها مركبة فضائية إذا اقتربت سرعتها من سرعة الضوء أو إذا مرت من خلال الجاذبية الهائلة بالقرب من بعض الأجرام السماوية.

التفسير: الكرات الطائرة للأعلى

إن الكرة العلوية لا ترتد من على الأرض، بل ترتد من على الكرة السفلية. في الحقيقة تُكمل الكرة العلوية ارتدادها حينما تتجه الكرة السفلية للأعلى. بعد التصادم، تدفع الكرتان بعضهما البعض بنفس الطريقة التي يدفع بها الصاروخ عادمه.

تتبادل الكرتان كمية الحركة والطاقة حينما يدفعان بعضهما، والكرة الصغيرة العلوية - والتي لها كتلة أقل وتتسارع بسهولة أكثر من الكرة السفلية - ينتهي بها المطاف بكمية حركة كبيرة للأعلى وبنصيب أكثر من الطاقة. تطير الكرة العلوية للأعلى كما لو أنها ضربت بمضرب كبير يتحرك للأعلى. في الواقع، إنها ضربت بكرة كبيرة تتحرك للأعلى فترتد بسرعة عالية.

إذا كانت كتلة الكرة الصغيرة مهملة حقيقة مقارنة بكتلة الكرة الكبيرة وارتدت الكرات دون فقد أي طاقة، فسترتد الكرة الصغيرة من على الكبيرة وتتحرك بثلاثة أضعاف سرعتها قبل الارتداد. ستصبح طاقتها الحركية تسعة أضعاف طاقتها الحركية قبل الاصطدام وسترتفع لتسعة أضعاف ارتفاعها الأصلي. بالطبع، الكرات الحقيقية ليست مثالية فلن ترتد كرة التنس لارتفاع عالٍ لهذه الدرجة. ومع ذلك يكون التأثير مثيراً جدا.

ملخص الفصل

كيفية عمل الدراجات

مع أن الدراجة الساكنة تنقلب بسهولة، إلا أن الدراجة المتحركة مستقرة بشكل مذهل. تبقى الدراجة منتصبة بمساعدة تأثيرين للحركة يؤديان للاستقرار - أحدهما بسبب ترنح الجايروسكوب والآخر بسبب شكل وزاوية الشوكة الأمامية. يعمل هذان التأثيران سوية لتوجيه الدراجة في اتجاه ميلها. كلما تميل الدراجة، تتحرك تلقائيا تحت مركز ثقلها وتعود للانتصاب. إن الميل جزء أساسي من الانعطاف أيضاً. بميل نفسه و/أو الدراجة بطريقة صحيحة أثناء الانعطاف، يضمن الراكب عدم وجود عزم دوران كلي على الدراجة وأنها لا تنقلب.

يشغّل الراكب الدراجة بدفع دواساتها في دائرة. بما أن الراكب يستطيع توفير أعظم قدرة تشغيل الدواسات عندما تدور الدواسات بمعدل متوسط ويدفعها بقوى متوسطة، فإن الدراجة المتعددة السرعات الحديثة تسمح له بتعديل معدل الدوران النسبي للدواسات والعجلات. باختيار الترس المناسب، تسمح الدراجة للراكب بتوفير قدرته القصوى بطريقة مريحة.

كيفية عمل الصواريخ

يحصل الصاروخ على دفعه من خلال طرده للغاز من محرك في ذيله. يدفع الصاروخ الغاز والغاز يرد الدفع. هذا الغاز يأتي عادة من احتراق وقود كيميائي محفوظ بالكامل داخل الصاروخ ذاته ويطلق من محرك الصاروخ من خلال فوهة. تسمح الفوهة المصممة بعناية للصاروخ باستخدام الطاقة المختزنة في الوقود بكفاءة بضمان خروج ذلك الغاز من الصاروخ

بأقصى سرعة ممكنة. يستخدم دفع الصاروخ لرفع الصاروخ ضد قوة الجاذبية وتسريعه للأعلى. عند وصوله للفضاء، وتوقف محركه، سيدور الصاروخ حول الأرض أو الشمس، أو قد يسافر للفضاء الخارجي.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون الجاذبية العامة: يجذب كل جسم في الكون الأجسام الأخرى الموجودة في الكون بقوة مساوية لثابت الجاذبية مضروبا في حاصل ضرب الكتلتين، ومقسوما على مربع المسافة التي تفصل بين الجسمين، أو (٢،٢،٤)

$$\text{القوى} = \frac{\text{ثابت الجاذبية} \times \text{الكتلة}_1 \times \text{الكتلة}_2}{(\text{المسافة بين الجسمين})^2}$$

٢. قانون كيبلر الأول: تتحرك جميع الكواكب في مدارات قطع ناقصة، بوجود الشمس في إحدى بؤرتي القطع الناقص.

٣. قانون كيبلر الثاني: يغطي الخط الممتد من الشمس إلى كوكب مساحات متساوية في أزمنة متساوية.

٤. قانون كيبلر الثالث: مربع الزمن الدوري المداري لكوكب يتناسب مع مكعب متوسط بعد ذلك الكوكب عن الشمس.

٥. كمية الحركة النسبية: كمية الحركة النسبية لجسم هي حاصل ضرب كتلته في سرعته مضروبا في المعامل النسبي. أو (٣،٢،٤)

$$\text{كمية الحركة النسبية} = \frac{\text{الكتلة} \times \text{السرعة}}{\sqrt{1 - \text{السرعة}^2 / \text{سرعة الضوء}^2}}$$

٦. الطاقة النسبية: الطاقة النسبية لجسم هي حاصل ضرب كتلة الجسم في مربع سرعة الضوء في المعامل النسبي، أو (٤،٢،٤)

$$\text{الطاقة النسبية} = \frac{\text{الكتلة} \times \text{سرعة الضوء}^2}{\sqrt{1 - \text{السرعة}^2 / \text{سرعة الضوء}^2}}$$

تحقق من فهمك - الإجابات

٤-١ الدراجات

١. تضمن قاعدة الكوب العريضة أن طاقته الكامنة الكلية ستستمر في الازدياد عند ميل الكوب، حتى وإن أصبح هذا الميل حاداً جدا، بحيث يعود بشكل طبيعي لاتزانه المستقر.

لماذا: الكوب ذو القاعدة الضيقة مستقر، لكن فقط إذا لم يمل بشكل كبير. بمجرد أن يتحرك مركز جاذبيته بعيدا عن قاعدة دعمه الأصلية، سينقلب. لكن الكوب ذا القاعدة العريضة له قاعدة دعم عريضة وسيعود لاستقراره حتى بعد ميل حاد.

٢. ترنح الجايروسكوب.

لماذا: عند توقيف العملة على حافتها يكون استقرارها الساكن قليلاً أو معدوماً وتسقط بسهولة. لكن عندما تدور للأمام بسرعة، فإن نفس تأثير ترنح الجايروسكوب، والذي يتسبب في توجيه الدراجة تحت مركز ثقلها، يؤثر أيضاً على العملة فيجعلها مستقرة حركياً على الرغم من أن اتزانها غير مستقر عادة.

٣. لتحرص أن تكون القوة المبذولة على زلاجاتها متجهة نحو مركز كتلتها.

لماذا: هناك العديد من الألعاب الرياضية والأوضاع التي تتطلب من اللاعبة أن تميل باتجاه الانعطاف. بما أن الانعطاف يتضمن دائما تسارعاً أفقياً وقوة أفقية، فيجب على اللاعبة أن تحرف مركز كتلتها لداخل الانعطاف. عندما تميل بالمقدار الصحيح، فإن محصلة القوة على قدميها تشير مباشرة باتجاه مركز كتلتها فلا تبذل أي عزم دوران عليها حول مركز كتلتها. تظل المتزلجة في وضع اتزان دوراني ولا تنقلب.

٤. كل دورة للعجلة العملاقة يأخذك لمسافة أبعد في صعود المنحدر ويتطلب الكثير من الشغل. للقيام بهذا الشغل الكبير في دورة واحدة على الدواسات، يجب أن تدفع الدواسات بقوة كبيرة.

لماذا: حينما تدير دواسات دراجة، فأنت تبذل شغلاً على الدواسات؛ تقوم بدفع الدواسات وهي تتحرك في اتجاه ذلك الدفع. إذا تطلب ذلك شغلاً كبيراً، كما هو الحال عند صعودك المنحدر راكباً البينيفارثنج، تصبح القوة المطلوبة فوق المحتمل.

٤-٢ الصواريخ والسفر في الفضاء

١. إنه يدفع ضد عادمه، كما هو الحال في جميع الصواريخ.

لماذا: مع أنه قد يظهر أن سحابة العادم تحت الصاروخ المطلق من الأرض هي ما يدفع الصاروخ للأعلى، إلا أن الأرض نفسها لا تساهم في عملية الدفع. إن فعل دفع الغاز ذاته خارج الفوهة هو ما يدفع الصاروخ للأمام.

٢. في الحقيقة هي منظمة بشكل دقيق. عمليا، تتكون المرحلة الأولى من صاروخي الوقود الصلب المعززة، والمرحلة الثانية هي خزانات الوقود السائل الخارجية، والمركبة نفسها هي المرحلة الثالثة.

لماذا: على الرغم من أن المكوك الفضائي ليس مرتباً كمراحل بعضها فوق بعض مثل صاروخ ساترن (Saturn) أو دلتا (Delta)، إلا أنه لا يسير من الأرض للفضاء كجسم واحد. إنه ينبذ خزانات الوقود الفارغة حينما يتسارع للأعلى. أول ما ينبذ هو الصاروخان المعززان، يتبعهما خزان الوقود الخارجي. إن الكتلة النهائية للمركبة ذاتها هي أقل بكثير من الكتلة التي غادرت منصة الإطلاق.

٣. يجب أن تقل المسافة بين الأرض والقمر.

لماذا: يتصرف القمر تماما مثل مركبة فضائية تدور حول الأرض على بعد مسافة 384,400km. مثل هذه المركبة الفضائية سيكون لها زمن دوري مداري مقداره ٢٧،٣ يوماً. لتقليل هذا الزمن الدوري المداري، يجب أن يقترب القمر من الأرض بحيث تستطيع جاذبية الأرض أن تحني مساره بسرعة أكبر.

٤. تتحرك بنصف السرعة عند أوجها الشمسي مقارنة بحضيضها الشمسي وستقابل الأرض مرة أخرى بعد عام واحد بالضبط.

لماذا: بموجب قانون كيبلر الأول، تسير المركبة الفضائية في مدار قطع ناقص. بما

أن قانـون كيبلر الثاني يتطلب منها أن تغطي المسـاحات بمعدل ثابت، فإن المركبة الفضائية يجب أن تتحرك بنصف السرعة عندما تكون على بعد ضعف المسافة من الشـمس. أخيرا، بما أن متوسط بعد المركبة الفضائية عن الشمس هو نفس متوسط بعد الأرض، فإن لهما نفس الزمن الدوري المداري. كلاهما سـيكمل دورة كاملة في مداريهما في عام واحد ويلتقيان في ذاك الوقت.

٥. يزيد قارب السـحب من كمية حركة المركبة الفضائية للأمام بمعدل ثابت، ولكن بموجب العلاقة النسـبية بين كمية الحركة والسرعة، تـزداد سرعة المركبة الفضائية بمعدل أبطأ.

لماذا: في السرعات المعتادة، سـيُنتج الانتقال الثابت لكمية حركة جسم زيادة ثابتة في سرعته. لكن بالقرب من سرعة الضوء، لا تسـتطيع زيادة سرعة الجسـم مجاراة الزيادة في كمية حركته.

٦. سؤال خادع! لا يمكنك تحديد الإجابة بأي طريقة!

لماذا: إن المبدأ الأسـاسي للنظرية النسـبية العامة هو أنه لا توجد أي تجربة يمكنك القيـام بها داخـل مركبتك الفضائية تمكنك من التمييز بـين نتائج الجاذبية ونتائج التسارع. يجب عليك ببساطة أن تنظر من النافذة لتفهم ماذا يحدث.

دقق في أرقامك - الإجابات

٤-٢ الصواريخ والسفر في الفضاء

١. حوالي N $10^{-7} \times 6.73$.

لماذا: نستخدم معادلة ٤,٢,٢ للحصول على القوة:

$$\text{القوة} = \frac{6.6720\times10^{-11}\,\text{N}.\frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}.1000\text{kg}\,.\,1000\text{kg}}{(10\text{m})^2} \quad \text{N}\ 10^{-7}\times6.6720$$

هـذه القوة مسـاوية لـوزن ذرة رمل تقريبـا. لا عجب أنه من الصعب الشـعور بالجاذبية من أي شيء عدا الكرة الأرضية بأكملها.

٢. $\sqrt{7/4}$ ضعف سرعة الضوء.

لماذا: عندما تسير المركبة الفضائية بنصف سرعة الضوء، فإن معادلة (4.2.3) تعطي كميـة حركتهـا الأمامية والتي هـي $\sqrt{1/3}$ مضروباً بكتلتها مضروبـاً بسرعة الضوء. مضاعفـة كمية الحركة تلك وحلّ معادلة (4.2.3) للحصول على السرعة ينتج $\sqrt{4/7}$ ضعف سرعة الضوء.

٣. طاقته الكلية هي 1.8×10^{17} J ، والتي نصفها هي طاقة سكون.

لماذا: بالنسبة لجسم يسير بسرعة 34 من سرعة الضوء، فإن معادلة (4.2.4) تعطي طاقة كلية تسـاوي 2 مضروباً في كتلته مضروباً في مربع سرعة الضوء. لجسم كتلته 1kg، تلك الطاقة تسـاوي 1.8×10^{17} J وببسـاطة، طاقة سـكونه تسـاوي كتلته مضروبـا في مربع سرعة الضوء، أو 9.0×10^{16} J . كلا قيمتي الطاقة كبيرة بشـكل مدهش.

تمارين

١. يبدأ العداءون سـباقاتهم من وضع انـحناء, بحيث تكون أجسامهم متقدمة جدا عن أقدامهم. تمكنهم هذه الوضعية من التسارع بسرعة دون الانقلاب للخلف. فسر هذا التأثير من حيث عزم الدوران ومركز الكتلة.

٢. إذا علق أسـفل العجلة الأمامية لدراجتك في بالوعة الشارع، قد تنقلب دراجتك بحيث تتحرك أنت للأمام متخطياً العجلة الأمامية. فسر هذا التأثير بدلالة الدوران، وعزم الدوران، ومركز الكتلة.

٣. عندما تنعطف أثناء الركض، يجب أن تميل باتجاه الانعطاف أو تجازف بالسقوط. إذا ملت باتجاه اليسار حينما تنعطف لليسار، لماذا لا تسقط لليسار؟

٤. إذا تسـارعت دراجـة بخارية بسرعة كبـيرة، فإن عجلتها الأمامية سـترتفع عن الأرضيـة. أثناء هذا العمل المثير، فإن الأرضية تبذل قوة احتكاك للأمام على العجلة الخلفية. كيف يمكن لقوة الاحتكاك تلك أن تتسبب في رفع العجلة الأمامية؟

٥. حينما يؤدي راكب لوحة التزلج حركات مثيرة داخل سـطح على شكل حرف U، فإنـه في الغالب يميل للداخل باتجاه منتصف الشـكل U. لماذا تمنعه هذه الإمالة من السقوط؟

٦. معظم سـيارات السـباق تُبنى منخفضـة جدا وقريبة مـن الأرض. مع أن هذا التصميم يقلل من مقاومة الهواء، فهو أيضا يعطي السيارات استقراراً حركياً أفضل عند الانعطاف. لماذا تكون هذه السـيارات المنخفضة أكثر اسـتقراراً من السيارات المرتفعة والتي لها نفس الأبعاد بين عجلاتها؟

٧. يتصل سـاعد خلاط المطبخ اليـدوي بترس كبير. هذا الترس الكبير يتشـابك مع تروس أصغر متصلة بشـفرات الخلاط. بما أن كل دورة للسـاعد تجعل الشـفرات تدور عدة مرات، كيف ترتبط القوة التي تبذلها على مقبض الساعد مع القوى التي تبذلها شفرات الخلاط على الخليط الذي حولها؟

٨. محـرك التشـغيل في سـيارتك مرتبط بترس صغير. يشـتبك هـذا الترس الصغير

مع ترس كبير مرتبط بساعد المحرك. يجب أن يدور محرك التشغيل عدة مرات لكي يجعل الساعد يدور دورة واحدة فقط. كيف يمكن لهذه التروس أن تسمح باستخدام قوى متواضعة داخل محرك التشغيل لإدارة الساعد بأكمله؟

٩. إن آلة صناعة الخبز تستخدم التروس لتقلل من سرعة دوران شفرة خلاطها. بينما يدور محركها حوالي 50 مرة في الثانية، تدور الشفرة مرة واحدة فقط في الثانية. يوفر المحرك كمية شغل محددة كل ثانية، فلماذا يسمح ترتيب التروس للآلة ببذل قوى هائلة على عجينة الخبز؟

١٠. يجب أن تكون سلسلة الدراجة البخارية قوية جدا. بما أن الدراجة البخارية لها سن واحدة فقط على عجلتها الخلفية، فإن أعلى السلسلة يجب أن يجذب للأمام بقوة لإبقاء العجلة الخلفية تدور أثناء صعود الدراجة لمنحدر. لماذا يجعل استبدال السن الخلفية للدراجة البخارية بأخرى لها أسنان أكثر من الأسهل للسلسلة إبقاء العجلة الخلفية تدور؟

١١. حينما تنظف الرصيف باستخدام نافخة أوراق الشجر، فإن النافخة تدفعك بعيدا عن الأوراق. ما الذي يدفع على النافخة بحيث تستطيع الدفع عليك؟

١٢. عندما يطلق قنّاص ببندقيته على هدف، ترتد البندقية للخلف بشكل مفاجئ قافزة بعيدا عن الهدف. فسر تأثير الارتداد هذا بدلالة انتقال كمية الحركة.

١٣. أي فعل سيعطيك كمية حركة أكبر باتجاه الشمال: قذف حذاء واحد باتجاه الجنوب بسرعة 10m/s أو قذف حذائين باتجاه الجنوب بسرعة 5m/s؟

١٤. هل يأخذ كلا الفعلين في تمرين ١٣ نفس كمية الطاقة؟ إذا كانت الإجابة لا، فأيهما يتطلب طاقة أكثر؟

١٥. أنت تدفع نفسك عبر سطح بحيرة مجمدة بضرب كرات تنس نحو الشاطئ الجنوبي. من منظورك، كل كرة تضربها تتجه نحو الجنوب بسرعة 160km/h. معك حقيبة كبيرة مليئة بالكرات وأنت تقترب من الشاطئ الشمالي بسرعة 160 km/h (100mph). عندما تضرب الكرة التالية باتجاه الجنوب، هل ستستمر بالتسارع للشمال؟

١٦. هل يمكنك استخدام الخطة المذكورة في تمرين ١٥ لدفع نفسك بأي سرعة، أم أنت محدود بالسرعة التي تضرب بها كرات التنس؟

١٧. أنت وصديقك ترتديان زلاجات عجلات. تقفان وجهاً لوجه على سطح مستوٍ وأملس وتبدآن برمي كرة ثقيلة ذهابا وإيابا بينكما. لماذا تنجرفان بعيدا عن بعضكما؟

١٨. إن الزمن الذي يستغرقه جسم صغير نسبيا ليدور حول جسم أكبر لا يعتمد على كتلة الجسم الصغير. استخدم رائد فضاء يمشي في الفراغ بالقرب من مكوك فضائي لتوضيح تلك النقطة.

١٩. حينما يدور القمر حول الأرض، في أي اتجاه يتسارع القمر؟

٢٠. أي الجسمين يبذل قوة جاذبية أكبر على الآخر، الأرض أم القمر، أم أن القوى متساوية في المقدار؟

٢١. إن تحرير مركبة أبولو الفضائية من جاذبية الأرض تطلّب مجهوداً كبيراً من الصاروخ ساترن V. وتحرير مركبة قمرية من جاذبية القمر تطلّب فقط عمل صاروخ صغير في قاعدة المركبة القمرية. لماذا يكون الإفلات من جاذبية القمر أسهل منه من جاذبية الأرض؟

٢٢. المركبات الفضائية في مدار أرضي قريب تستغرق حوالي 90 دقيقة للدوران حول الأرض. لماذا لا يمكن جعلهم يدورون حول الأرض في نصف هذه المدة؟

٢٣. حينما يقترب مذنب من الشمس، فإنه يتقوس حول الشمس بسرعة أكبر. فسر ذلك.

٢٤. نصف قطر مدار المريخ أكبر من نصف قطر مدار الأرض. قارن بين السنوات الشمسية على ذلك الكوكبين.

مسائل

١. إذا رفع قاذف كرة في لعبة البيسبول ذو كتلة 80kg ويرتدي زلاجة عجلات عديمة الاحتكاك كرة بيسبول كتلتها 0.145kg وقذفها باتجاه الجنوب بسرعة 42 m/s (151km/h أو 94mph)، بأي سرعة سوف يبدأ بالتحرك باتجاه الشمال؟

٢. على أي ارتفاع فوق مستوى سطح الأرض يجب أن تكون لكي يصل وزنك لنصف قيمته الحالية؟

٣. إذا مشيت على سطح القمر، ستستمر جاذبية الأرض بجذبك بشكل ضعيف وسيبقى لك وزن أرضي. ما مقدار ذلك الوزن الأرضي، مقارنة بوزنك الأرضي على سطح الأرض؟ (ملاحظة: نصف قطر الأرض هو 6378km والمسافة التي تفصل بين مركزي الأرض والقمر هي 384,400km.)

٤. إذا كنت تبعد عن صديقك 10 m وكتلة كل واحد منكما 70kg، ما مقدار قوة الجاذبية التي تبذلها على صديقك؟

٥. إن جاذبية الثقب الأسود قوية جدا حتى أن الضوء لا يمكنه الإفلات من خلال سطحها أو «أفق الحدث Event horizon». حتى خارج ذلك السطح، فإن طاقات هائلة مطلوبة للإفلات. افترض أنك على بعد 10km من مركز ثقب أسود له كتلة

1031kg. إذا كانت كتلتك 70kg، ما هو وزنك؟

٦. في مسـألة ٥، ما مقدار الشـغل الذي يجب أن يبذله شيء ما عليك لإبعادك 1m أكثر عن الثقب الأسود؟

٧. تتجـاوزك مركبة فضائية كتلتها 1000kg تسـير للأمام بنصـف سرعة الضوء. ما مقدار كمية حركتها النسبية؟

٨. تتجـاوزك مركبة فضائية تتحرك للأمام بثلث سرعـة الضوء. ما هو مقدار زيادة كمية حركتها النسبية إذا تضاعفت سرعتها؟

٩. بالنسـبة لصاروخ يسير بسرعة 10,000m/s، ما مقدار تغير كمية حركته النسبية عن كمية حركته الاعتيادية؟

١٠. ما هي طاقة السكون لكيلوجرام واحد من اليورانيوم؟

١١. ما مقدار الكتلة التي لها طاقة سكون مساوية لـ 1000J؟

١٢. تتجـاوزك مركبة فضائية كتلتهـا 1000kg تتحرك بنصف سرعة الضوء. ما هي طاقتها النسبية؟

١٣. تتجاوزك مركبة فضائية تسـير بـ 3/1 سرعة الضوء. بأي مقدار سـتزيد طاقتها النسبية إذا تضاعفت سرعتها؟

١٤. بأي مقدار ستزيد الطاقة النسبية المذكورة في مسألة ١٣ إذا طرحت منها طاقة السكون الثابتة؟

الفصل ٥

الموائع

إلى الآن كانت جميع الأجسام اليومية التي درسناها جوامد. لكن بما أن الغازات والسوائل هي أيضاً أجزاء مهمة من العالم الذي حولنا – كالهواء الذي نتنفسه، والماء الذي نسبح فيه، وحتى الدم الذي نضخه في عروقنا - فإننا سنلتفت الآن لأجسام، خلاف الجوامد، ليس لها أشكال واضحة المعالم، تسمى هذه الأجسام موائع، ودراسة سلوك المائع وحركته تعد مجالاً واسعاً، يمتد عبر العلوم والهندسة. إن حركة الموائع، وكثيراً ما تسمى علم قوة الموائع (الديناميكا المائية hydrodynamics)، مهمة جداً لمهندس آبار النفط تماماً مثل أهميتها لعالم بوظائف أعضاء الحيوانات أو للفيزيائي الفلكي. إن الأدوات المستخدمة لتحليل الموائع أكثر تعقيداً ف من مثيلاتها للجوامد لأن الموائع ذاتها أكثر تعقيدا: من الصعب بذل قوة عليها مباشرة، وحتى وإن تمكنا من ذلك ففي الغالب لن تتحرك كجسم صلب واحد. في هذا الفصل، سندرس بعض المفاهيم والأدوات التي نحتاجها لفهم سلوك الموائع المعقد.

تجربة: الغوّاص الديكارتي

أحد هذه المفاهيم هو الطفو (buoyancy): الجسم المغمور في مائع يواجه قوة للأعلى من قِبل ذلك المائع. قوة الطفو هذه هي التي ترفع بالوناً مليئاً بالهيليوم للسماء وتعلق القارب على سطح الماء. كيفية استجابة الجسم للطفو تعتمد على الكثافات





بإذن من لوي بلومفيلد

النسبية للجسم والمائع المحيط به، حيث أن الكثافة هي نسبة الكتلة إلى الحجم. كما سنرى في هذا الفصل، الجسم الأكثر كثافة من المائع المحيط به يغطس، بينما الجسم الأقل كثافة من ذلك المائع يطفو. لرؤية مدى أهمية الكثافة في تحديد غطس الجسم أو طفوه، يمكنك بناء لعبة بسيطة تسمى الغوّاص الديكارتي. هذه الأداة الشعبية تشتمل على قنينة صغيرة مليئة بالهواء تطفو في وعاء مغلق بإحكام مليء بالماء. في العادة، فقاعات الهواء داخل القنينة تبقيها طافية على سطح الماء، لكن كلما ضغطت على الوعاء غطست القنينة.

لصنع غوّاص ديكارتي، ستحتاج فقط زجاجة مشروب صودا بلاستيكية وقنينة صغيرة مفتوحة من طرف واحد. يمكن للقنينة أن تكون مصنوعة من أي شيء تقريباً- بلاستيك، أو معدن، أو زجاج - طالما أنها كثيفة بما يكفي لغطسها في الماء. املأ زجاجة مشروب الصودا تماماً بالماء واجعل القنينة تطفو بداخلها رأساً على عقب؛ الهواء المحصور داخل القنينة سيبقي القنينة طافية. الآن قلل ببطء من حجم فقاعة الهواء داخل القنينة إلى أن تصبح القنينة بالكاد تطفو. يمكنك القيام بهذا التعديل بإمالة القنينة للسماح ببعض الهواء بالخروج أو بإخراج القنينة من الزجاجة وملئها بالماء. بمجرد أن تتمكن من جعل القنينة تطفو بضعة مليمترات فقط خارج الماء عند أعلى قمة زجاجة مشروب الصودا، أغلق زجاجة مشروب الصودا واستعد لاختبار غوّاصك.

قبل أن تضغط على زجاجة مشروب الصودا، حاول أن تتنبأ ماذا سيحدث عندما تقوم بذلك. كيف سيؤثر الضغط

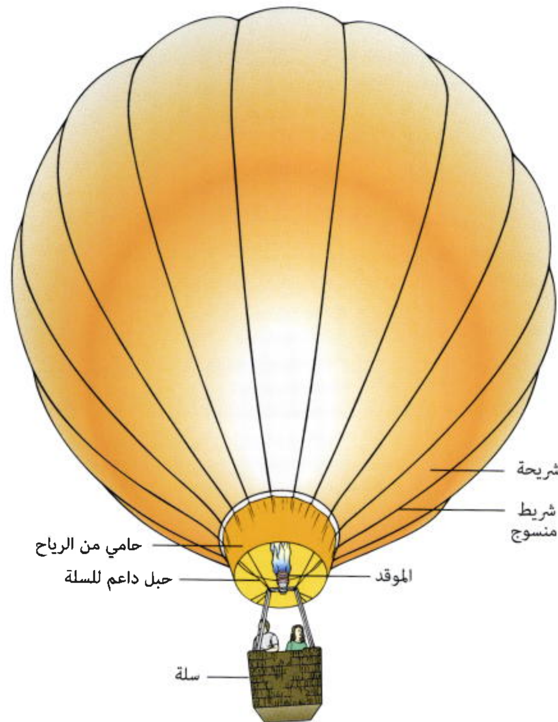
على الزجاجة على فقاعة الهواء وموقع القنينة في الماء؟ الآن اضغط الزجاجة بقوة ولاحظ النتائج. هل حققت تنبؤاتك؟ قس حجم فقاعة الهواء أثناء ضغطك على الزجاجة. كيف يعتمد حجم الفقاعة على قوة ضغطك على الزجاجة؟ لماذا يجب أن تكون هناك علاقة بين الاثنين؟ ما هي العلاقة بين حجم فقاعة الهواء وارتفاع الغواص في الماء؟

حينما تخفف الضغط من على الزجاجة، سيطفو الغواص عائداً للسطح. لماذا يصبح الغوّاص الغاطس فجأة طافياً مرة أخرى؟ وبالضغط على الزجاجة بعناية، يمكنك حتى أن تجعل الغوّاص يحوم في منتصف الزجاجة. حاول أن تجعل الغوّاص يحوم وعيناك مغمضتان. لماذا من الصعب إبقاء القنينة تحوم؟ لماذا يجب عليك أن تراقب الغوّاص لجعله يحوم؟

دليل الفصل

سنعود للغوّاص في نهاية الفصل، لكن أولاً سنفحص أمرين من العالم من حولنا: (١) البالونات و(٢) توزيع الماء. في قسم البالونات، سنستكشف كيف أن مفاهيم الضغط والطفو تساعد في تفسير كيف أن الغلاف الجوي يحافظ على مناطيد الهواء الساخن وبالونات الهيليوم من السقوط للأرض. وفي قسم توزيع الماء، سنرى كيف أن الضغط يدفع الماء خلال أنابيب الماء والطرق التي يمكن للماء أن يحتوي طاقة. للاطلاع على عرض أشمل لهذا الفصل، اقفز للأمام لملخص الفصل في صفحة ١٥٥.

القضايا التي سننظر إليها تظهر بشكل متكرر في تجارب حياتنا اليومية. يلعب الضغط دوراً مهماً في علب البخاخات، والمحركات البخارية، والألعاب النارية، وحتى الطقس؛ الطفو يدعم السفن على الماء ويحافظ على إبقاء الزيت فوق الخل في زجاجة صلصة السلطة. بنفس الأهمية، هذه المفاهيم ستضع الأسس للفصل السادس، حيث سنفحص أجساماً تؤثر فيها الحركة على سلوك الموائع.



٥-١ البالونات

بما أن الجاذبية تعطي كل جسم قريب من سطح الأرض وزناً يتناسب مع كتلته، فإن الأجسام تهبط عندما تسقطها. لماذا إذاً يتحرك بالون مليء بالهيليوم – وهو أيضاً جسم له كتلة ووزن – للأعلى إلى السماء عندما تتركه؟ هل للبالون كتلة سالبة أو وزن سالب، أم أننا نسينا أمراً ما؟

لقد نسينا الهواء – بالتحديد، طبقة الهواء التي تظل فوق سطح الأرض والتي تبقى في مكانها بسبب الجاذبية. بما أنه يصعب رؤية هذا الهواء ويتحرك بسهولة بعيداً عن طريقنا، فإننا كثيراً ما ننسى أنه موجود. ولكن الهواء يجعل نفسه ملحوظاً بعض الأحيان. عندما تركب دراجة، فأنت تشعر بقواه؛ وعندما تنفخ كرة الشاطئ فأنت ترى أنه يأخذ حيزاً من الفراغ. وعندما تطلق بالون الهيليوم، فالهواء يرفع البالون للأعلى.

أسئلة للتفكير

بما أن معظم الأجسام تسقط إلى الأرض خلال الجو، لماذا لا يسقط الهواء نفسه؟ لماذا يكون الهواء «أخف» في الجبال عنه عند مستوى سطح البحر؟ إذا امتصصت كل الهواء من كيس بلاستيكي، ما الذي يضغط على الكيس ليكون كصفحة رقيقة؟ لماذا نفخ الهواء في الكيس يجعله ينتفخ؟ ماذا يحدث لكتلة الكيس الكلية عندما تملؤه بالهواء؟ أو بالهواء الساخن؟ أو بالهيليوم؟ إذا أخذت بالون هيليوم ً للقمر، حيث لا يوجد أي هواء، ثم أطلقته، في أي اتجاه سيتحرك؟

تجارب يمكن القيام بها

اسحب الخيط المربوط ببالون الهيليوم لتشعر بكيفية تصرف البالون. إذا سحب أصابعك للأعلى، هل يعني ذلك أن وزنه (وكتلته) سالب؟ كيف يستجيب جسم له كتلة سالبة للقوة؟ هزّ البالون وأقنع نفسك أن كتلة البالون موجبة. هل تظن أن هناك أجساماً لها كتل سالبة؟ بما أن كلاً من كتلة البالون ووزنه موجبة، فلا بد أن الجاذبية تجذب البالون للأسفل. لكن كيف للبالون الساكن أن يسحب أصابعك للأعلى؟ ما هي القوى الأخرى التي يمكن أن تدفع البالون للأعلى؟ يمكنك أن تعزز هذه القوى الدافعة للأعلى عن طريق تغطيس البالون جزئياً في وعاء ماء. ما هي المواضع الأخرى في حياتنا اليومية التي تظهر فيها

قوى مماثلة دافعة للأعلى؟ خذ البالون في جولة بالسيارة. في أي اتجاه سيتحرك البالون عندما تتحرك السيارة فجأة؟ عندما تقف فجأة؟ مرة أخرى، يبدو كما لو أن كتلة البالون سالبة. ما هو الشيء الذي يدفع على البالون ليجعله يتحرك بهذه الطريقة غير المتوقعة؟

الهواء وضغط الهواء

تُدعم مناطيد الهواء الساخن وبالونات الهيليوم بالهواء المحيط بهما، على الرغم من أن هذه البالونات لها كتل موجبة وأوزان للأسفل، فالهواء المحيط يدفعهما للأعلى بقوة كافية لموازنة وزنهما بحيث تطفو. لفهم البالونات، يجب أن نبدأ بفهم الهواء.

مثل الأجسام التي سبق أن درسناها، فللهواء كتلة ووزن. لكن على خلاف تلك الأجسام، ليس له شكل أو حجم ثابت. يمكنك أن تُشكّل 1kg من الهواء لأي شكل ترغب فيه ويمكنه أن يحتل مدى واسعاً من الأحجام. الهواء قابل للانضغاط، أي يمكنك ضغط كتلة محددة منه في أي فراغ تقريباً. على سبيل المثال، يمكن لـ 1kg من الهواء أن يملأ خزّان غطس أو صالة كاملة للعبة السلة.

هذه المرونة في الحجم والشكل تنشأ من طبيعة الهواء المجهرية. الهواء هو غاز، أي مادة تتكون من جسيمات فردية صغيرة جدا تتحرك بشكل مستقل. هذه الجسيمات الفردية هي الذرات والجزيئات. الذرة هي أصغر جزء من العنصر والذي يحافظ على جميع الخصائص الكيميائية لذلك العنصر؛ الجزيء، والذي هو تجمع ذرتين أو أكثر، هو أصغر جزء من مركب كيميائي والذي يحافظ على جميع الخصائص الكيميائية لذلك المركب. ترتبط ذرات الجزيء ببعضها بواسطة روابط كيميائية، وتتكون الروابط من قوى كهرومغناطيسية بين الذرات.

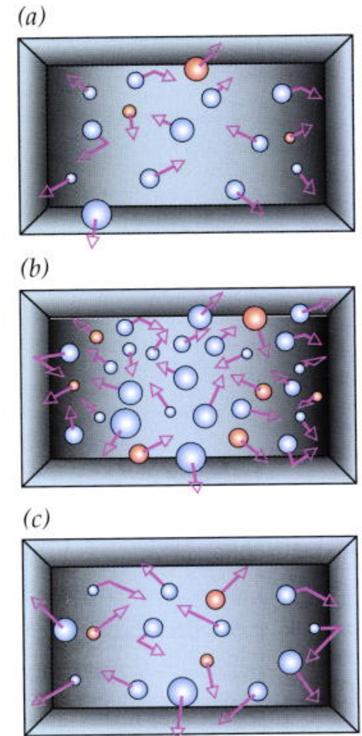
إن جزيئات الهواء صغيرة جدا، قطرها أقل من جزء من مليون من المليمتر. معظمها هي جزيئات نيتروجين وأكسجين، لكن يوجد أيضا جزيئات ثاني أكسيد الكربون، والماء، والميثان، والهيدروجين، وذرات الأرجون، والنيون، والهيليوم، والكربتون، والزينون. تلك الذرات، والتي لا تكوّن روابط كيميائية قوية وفي النادر ما تكون جزيئات، تسمى غازات خاملة بسبب عدم نشاطها الكيميائي.

مثل كرات الرخام الصغيرة جدا (البلية)، فإن جسيمات الهواء هذه لها أحجام وكتل وأوزان. لكن في حين البليات تستقر بسرعة على الأرض عندما تسكبها من كيس، فإن جسيمات الهواء لا يبدو أنها تسقط إطلاقا. لماذا لا تتراكم على سطح الأرض؟

الإجابة لها ارتباط بطاقة الهواء الحرارية، وبالتحديد بالجزء من تلك الطاقة الذي يكمن في حركات جسيمات الهواء. الطاقة الحركية الداخلية هذه تُبقي جسيمات الهواء الصغيرة جدا في حركة ودوران وبعيدة عن سطح الأرض. على النقيض من ذلك، الكرات الرخامية (البليات) الحقيقية كبيرة جدا وثقيلة بحيث لا تتحرك بشكل واضح بواسطة الطاقة الحرارية. تقاس طاقة الهواء الحركية الداخلية لكل جسيم بدرجة حرارته؛ كلما زادت تلك الطاقة لكل جسيم، كان الهواء أسخن. مع أن طاقة الهواء الحرارية تشمل أيضاً جزءاً مخزوناً في القوى بين الجسيمات، فإن هذه الطاقة الكامنة الداخلية مهملة لأن متوسط القوى بين جسيمات الهواء ضعيف جدا.

إن نظرة أوسع للهواء ستكشف عدداً لا نهائياً من الجسيمات الفردية في حركة حرارية هوجاء (شكل ١,١,٥ أ). عند درجة حرارة الغرفة، تسير هذه الجسيمات بمثل سرعات قذائف الرصاص تقريبا 500m/s (1100mph)، لكنها تتصادم بكثرة بحيث أنها لا تحدث تقدماً يذكر في أي اتجاه محدد. بين التصادمات، تتحرك جسيمات الهواء بمسارات مستقيمة تقريبا لأن الجاذبية ليس لديها الوقت الكافي لتجعلها تسقط مسافات بعيدة.

دعنا نهمل الجاذبية حالياً وننظر ما يحدث داخل صندوق يحتوي على 1kg من الهواء. تتحرك جسيمات الهواء بسرعة داخل الصندوق وكلما يرتد جسيم من على جدار الصندوق فإنه يبذل قوة على ذلك الجدار.



شكل ١,١,٥: (أ) حينما ترتد جسيمات الهواء من على الأسطح، فإنها تبذل ضغطاً على تلك الأسطح؛ ومقدار الضغط يعتمد على درجة حرارة الهواء وعلى مقدار اكتظاظه بالجسيمات، أي كثافته. (ب) اكتظاظ جسيمات الهواء بكثافة أكبر يزيد من عدد الجسيمات التي تصطدم بالأسطح كل ثانية. (ج) زيادة درجة حرارة الهواء تزيد من سرعة الجسيمات (تظهر كأسهم) بحيث أنها تصطدم بالأسطح بقوة أكبر وبتكرار أكبر. أي تغير في السرعة أو تكرار التصادم يزيد من ضغط الهواء.

على الرغم من أن القوة الفردية صغيرة جدا، إلا أن عدد الجسيمات ليس صغيراً، وسوية تنتج قوة متوسطة كبيرة. حجم هذه القوة الكلية يعتمد على مساحة سطح الجدار؛ كلما كبرت مساحة السطح، زاد متوسط القوة الذي يواجهه. ولكن لكي نصِف الهواء لا نحتاج في الحقيقة لمعرفة مساحة سطح الجدار؛ بل يمكننا أن نشير لمتوسط القوة الذي يبذله الهواء على كل وحدة من مساحة السطح، وهذه الكمية تسمى الضغط.

يقاس الضغط بوحدة القوة-لكل-مساحة. بما أن وحدة مساحة السطح بوحدة النظام العالمي SI هي المتر٢ (اختصارا m^2 وغالبا يشار إليها بالمتر المربع)، فإن وحدة النظام العالمي SI للضغط هي نيوتن-لكل-متر^2. هذه الوحدة تسمى أيضا باسكال (اختصارا Pa)، نسبة للرياضي والفيزيائي الفرنسي بلايس باسكال. واحد باسكال هو ضغط صغير؛ على النقيض، فالهواء من حولك له ضغط حوالي 100,000Pa ($2100lbf/ft^2$ أو $15lbf/inch^2$)، فيبذل قوة مقدارها حوالي 100,000N على سطح مساحته $1m^2$. بما أن 100,000N (22,500lbf) هي تقريبا وزن حافلة كبيرة، فإن ضغط الهواء يمكنه أن يبذل قوى هائلة على الأسطح الكبيرة.

إضافة للدفع على أسطح صندوقنا الافتراضي، يدفع الهواء أيضاً على أي جسم مغمور فيه. ترتد جسيماته من على أسطح الجسم، وتدفعها للداخل. طالما أن الجسم يمكنه تحمل هذه القوى الضاغطة، فإن الهواء لن يؤثر عليه كثيراً حيث أن ضغط الهواء المنتظم يضمن أن القوى على جميع جوانب الجسم تلغي بعضها البعض بالكامل.

على سبيل المثال، ستواجه ورقة محصلة قوة مقدارها صفر لأن مجموع القوى المبذولة على جانبيها يؤول للصفر.

ترتد جسيمات الهواء من على بعضها أيضا، لذا فإن ضغط الهواء يبذل قوى على الهواء أيضا. مكعب من الهواء داخل الصندوق يواجه جميع القوى الداخلية التي يواجهها مكعب من المعدن. الهواء حول المكعب يدفع عليه للداخل، والمكعب يدفع على الهواء الذي حوله للخارج. بما أن محصلة القوة على مكعب الهواء تساوي صفراً، فإن المكعب لا يتسارع.

تحقق من فهمك # ١: الإمساك بالامتصاص

(للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

بعد أن تدفع كوباً ماصاً على جدار أملس، ينحني الكوب البلاستيكي ويتكون حيز فراغ صغير بين الكوب والجدار. ما الذي يبقي الكوب الماص على الجدار؟

الضغط والكثافة ودرجة الحرارة

بما أن الضغط ينشأ من جسيمات هواء مرتدة، فإنه يعتمد على مدى تكرار وقوة ارتداد هذه الجسيمات في منطقة معينة من السطح. كلما زاد تكرار أو قوة التصادم، زاد ضغط الهواء.

لزيادة المعدل الذي تصطدم به جسيمات الهواء بسطح، يمكننا أن نعبئها بإحكام أكبر. إذا أضفنا 1kg آخر من الهواء لصندوقنا الافتراضي، سنضاعف عدد جسيمات الهواء في الحجم نفسه، والذي يضاعف المعدل الذي تصطدم به الجسيمات بكل سطح وبالتالي يضاعف الضغط (شكل ١,١,٥ ب). وهكذا، يتناسب ضغط الهواء مع كثافته، أي كتلته لكل وحدة حجم.

بما أن وحدة الحجم في النظام العالمي SI هي متر^3 (اختصارا m^3 وفي الغالب يشار إليه بمتر مكعب)، فإن وحدة الكثافة في النظام العالمي SI هي كيلوجرام-لكل-متر^3 (اختصارا kg/m^3). للهواء المحيط بك كثافة مقدارها حوالي $1.25kg/m^3$ ($0.078lbm/ft^3$). على النقيض من ذلك، للماء كثافة أكثر بكثير مقدارها تقريبا $1000kg/m^3$ ($62.4lbm/ft^3$). يمكننا أيضاً زيادة المعدل الذي تصطدم به جسيمات الهواء بسطح عن طريق زيادة سرعتها (شكل ١,١,٥ ج). إذا ضاعفنا الطاقة الحركية الداخلية للهواء في صندوقنا، فإننا نضاعف الطاقة الحركية المتوسطة لكل جسيم. بما أن الطاقة الحركية للجسيم تعتمد على مربع سرعته، فإن مضاعفة طاقته الحركية يزيد من سرعته بمقدار المعامل 2 . نتيجة لذلك، كل جسيم يصطدم بالسطح 2 مرة أكثر ويبذل 2 مرة من القوة المتوسطة عند الاصطدام. ويبذل كل جسيم 2 ·2 أو ضعف القوة المتوسطة، فإن الضغط يتضاعف. وبالتالي يتناسب

ضغط الهواء مع متوسط الطاقة الحركية لجسيماته - أي مع متوسط طاقتها الحركية الداخلية.

تقاس هذه الطاقة الحركية المتوسطة لكل جسيم بدرجة حرارة الهواء؛ كلما كان الهواء أسخن، زادت الطاقة الحركية المتوسطة لكل جسيم وزاد ضغط الهواء. ولكن المقياس الأكثر سهولة لربط درجة حرارة الهواء مع ضغطه ليس مقياس السلزيوس (C°) (المئوية) الشائع أو الفهرينهايت (F°)؛ بدلا من ذلك، هو مقياس درجة حرارة مطلقة خاص. إن مقياس النظام العالمي SI للحرارة المطلقة هو مقياس كالفن (K). عندما تكون درجة حرارة الهواء 0K (‎-273.15°C أو ‎-459.67°F)، فإنه لا يحتوي على أي طاقة حركية داخلية وليس له أي ضغط؛ درجة الحرارة هذه تسمى الصفر المطلق. إن مقياس الكالفن مماثل لمقياس السلزيوس، غير أنه مزاح بحيث تكون 0K مساوية لـ ‎-273.15°C . إضافة لربط درجة الحرارة الصفرية بالطاقة الحركية الداخلية الصفرية، فإن مقياس كالفن يتفادى الحاجة لدرجات حرارة سالبة. درجة حرارة الغرفة حوالي 293K.
بما أن ضغط الهواء يتناسب مع كلٍّ من كثافة الهواء ودرجة حرارته المطلقة، فيمكننا التعبير عن العلاقة بين هذه الكميات بالطريقة التالية:

الضغط $\propto$ الكثافة × درجة الحرارة المطلقة (١,١,٥)

هذا التناسب مفيد، لأنه يسمح لنا بالتنبؤ بالذي سيحدث إذا قمنا بتغيير درجة حرارة أو كثافة غاز معين، مثل الهواء. لكن له أيضا حدوده؛ بالتحديد، إنه لا ينفع إذا قارنا ضغط غازين مختلفين، مثل الهواء والهيليوم، والذين يختلفان في تراكيبهما الكيميائية. للقيام بمثل هذه المقارنة، سنحتاج لتطوير معادلة (١,١,٥). سنقوم بذلك لاحقاً عندما ندرس بالونات الهيليوم.

حتى عند وصف غاز معين، فإن معادلة (١,١,٥) لها أوجه قصور أخرى. إن المشكلة الرئيسية هي أن جسيمات الغاز الحقيقية ليست مستقلة عن بعضها تماماً. إذا انخفضت درجة الحرارة بشكل كبير، فإن الجسيمات تبدأ بالالتصاق مع بعضها لتكوّن سائلاً وتصبح معادلة (١,١,٥) غير صحيحة. لكن بغض النظر عن محدودية تلك المعادلة، إلا أن هذه العلاقة البسيطة بين الضغط والكثافة ودرجة الحرارة ستكون مفيدة في فهم كيفية طفو مناطيد الهواء الساخن: ستساعدنا في فهم التركيب الأساسي للجو الأرضي، ومصادر القوة المتجهة للأعلى التي تبقي منطاد الهواء الساخن مرتفعاً، والسبب في ارتفاع الهواء الساخن.

الكمية	وحدة النظام العالمي SI	وحدة النظام البريطاني	SI ← النظام البريطاني	النظام البريطاني ← SI
المساحة	متر² (m^2)	قدم² (ft^2)	$1m^2 = 10.764\ ft2$	$1ft^2 = 0.092903\ m^2$
الحجم	متر³ (m^3)	قدم³ (ft^3)	$1m^3 = 35.315\ ft^3$	$1\ ft^3 = 0.028317\ m^3$
الضغط	باسكال (Pa)	باوند قوة-لكل-قدم² (lbf/ft^2)	$1Pa = 0.020885\ lbf/ft^2$	$1\ lbf/ft^2 = 47.880\ Pa$
الكثافة	كيلوجرام-لكل- متر³ (kg/m^3)	باوند كتلة-لكل-قدم³ (lbm/ft^3)	$1kg/m^3 = 0.062428\ lbm/ft^3$	$1\ lbm/ft^3 = 16.018\ kg/m^3$

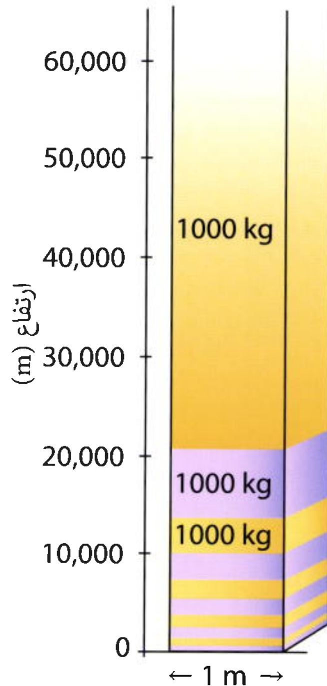
تحقق من فهمك # ٢: الوجبات الخفيفة التي تفرقع في الليل (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

إذا أخرجت وعاء طعام ممتلئاً جزئياً من الثلاجة وتركته يسخن لدرجة حرارة الغرفة، فإن غطاء الوعاء في الغالب سيتقوس للخارج ويمكن أيضا أن ينفتح بفرقعة. ما الذي حدث؟

الغلاف الجوي للأرض

معظم كتلة الغلاف الجوي للأرض محصور في طبقة سمكها أقل من 6km (4mile). بما أن قطر الأرض يساوي 12,700km (7,900miles)، فإن هذه الطبقة رقيقة نسبيا - رقيقة جدا بحيث لو كانت الأرض بحجم كرة السلة فإن الطبقة لن تكون أسمك من ورقة.

يظل الغلاف الجوي على سطح الأرض بسبب الجاذبية. كل جسيم هواء، كما رأينا، له وزن. وتماما مثل ما تسقط كرة الرخام (البلية) المقذوفة للأعلى إلى الأرض، فكذلك تستمر جسيمات الهواء في العودة لسطح الأرض. على الرغم من أن الجسيمات تسير بسرعة عالية جدا بحيث لا تستطيع الجاذبية أن تؤثر على حركتها بشكل ملحوظ على المدى القصير، إلا أن الجاذبية تعمل ببطء لإبقائها قريبة نسبيا من سطح الأرض. إن جسيم الهواء، مثل البلية السريعة الحركة، قد يظهر أنه يسير بدءاً في خط مستقيم، لكنه سيتقوس ويبدأ بالسقوط للأسفل بعد حين. ستتمكن فقط أخف وأسرع الجسيمات حركة في الغلاف الجوي، مثل جزيئات الهيدروجين وذرات الهيليوم، من الإفلات من جاذبية الأرض بين حين وآخر والانجراف للفضاء بين الكواكب.



شكل ٢,١,٥: الهواء الذي في عمود من الغلاف الجوي قاعدته $1m^2$ له كتلة حوالي 10,000kg. الـ 1000kg السفلية مضغوطة بإحكام أكثر، لأنها تدعم أثقل وزن فوقها. في الارتفاعات الأعلى، يكون الهواء مضغوطاً بإحكام أقل لأنه يعلوه وزن أقل.

بينما تجذب الجاذبية الغلاف الجوي للأسفل، يدفع ضغط الهواء الغلاف الجوي للأعلى. عندما تحاول جسيمات الهواء السقوط لسطح الأرض، تزداد كثافتها وضغطها أيضا. إن ضغط الهواء هذا هو الذي يدعم الغلاف الجوي ويمنعه من الانهيار في ركام رقيق على الأرض.

لفهم كيف تقوم الجاذبية وضغط الهواء بتنظيم الغلاف الجوي، تصوّر عموداً من الغلاف الجوي قاعدته مساحتها ١ متر مربع كما لو أنه تراكم طويل من قوالب هواء، كتلة القالب الواحد 1kg (شكل ٢,١,٥). هذه القوالب تدعم بعضها البعض بضغط الهواء لتكوّن تراكماً من حوالي ١,٠٠٠ قالب. يجب أن يدعم القالب السفلي وزن جميع القوالب التي تعلوه، وهو مضغوط بإحكام، بارتفاع 0.8m تقريبا، وكثافة حوالي $1.25kg/m^3$، وضغط حوالي 100,000Pa. القالب الأكثر ارتفاعاً في الركام عليه أن يدعم وزناً أقل وهو مضغوط بإحكام أقل. كلما نظرت لأعلى الركام، قلّت كثافة الهواء وقلّ ضغط الهواء.

في الحقيقة، للغلاف الجوي نفس تركيب هذه القوالب المتراكمة. يدعم الهواء القريب من الأرض وزن عدة كيلومترات من الهواء الذي يعلوه، فيعطيه كثافة مقدارها حوالي $1.25kg/m^3$ وضغطاً تقريبا 100,000Pa؛ لكن في الارتفاعات الأعلى، تقل كثافة الهواء وضغطه، لأن الغلاف الجوي الذي يعلوه يقل ولا يحتاج الهواء لدعم وزناً كثيراً كما هو الحال في الارتفاعات المنخفضة. لذا فإن الهواء في المرتفعات «أخف» من الهواء في المنخفضات. أياً كان الارتفاع، فإن ضغط الهواء المحيط يسمى الضغط الجوي.

تحقق من فهمك # ٣: السير في الجبال ألم في الآذان (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

حينما تسير للأعلى وللأسفل في الجبال، قد تشعر بفرقعة في أذنيك عندما يتحرك الهواء ليعادل الضغط داخل وخارج طبلة أذنك. ما الذي يسبب هذه التغيرات في الضغط؟

القوة الرافعة لمنطاد: الطفو

حتى الآن، فحصنا الهواء، وضغط الهواء، والغلاف الجوي. مع أنه قد يبدو أننا تجنبنا التعامل مع المناطيد، إلا أن هذه المواضيع لها تأثير كبير في إبقاء منطاد الهواء الساخن أو بالون الهيليوم محلقاً.

كما رأينا، الهواء في الغلاف الجوي للأرض هو مائع، مادة عديمة الشكل لها كتلة ووزن. هذا الهواء له ضغط ويبذل قوى على الأسطح التي يلامسها؛ يكون ذلك الضغط أكبر ما يمكن بالقرب من الأرض ويقل مع زيادة

الارتفاع. إن ضغط الهواء وتغيره مع الارتفاع يسمحان للهواء برفع منطاد الهواء الساخن أو بالون الهيليوم من خلال تأثير يعرف بالطفو.

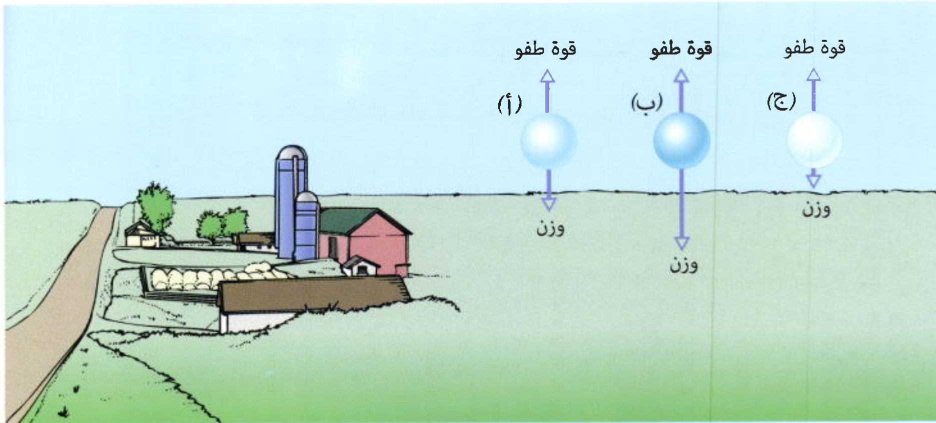
وُصف الطفو لأول مرة قبل أكثر من ألفي عام من قبل عالم الرياضيات اليوناني أرخميدس (٢١٢ – ٢٨٧ قبل الميلاد). أدرك أرخميدس أن جسماً مغموراً جزئياً أو كلياً في مائع يؤثر عليه قوة طفو للأعلى مساوية لوزن المائع المزاح. مبدأ أرخميدس في الحقيقة هو مبدأ عام جداً وينطبق على أجسام طافية أو مغمورة في أي مائع، بما في ذلك الهواء، أو الماء، أو الزيت. تنشأ قوة الطفو في القوى التي يبذلها المائع على أسطح الجسم. لقد رأينا أن مثل تلك القوى قد تكون كبيرة جدا لكن تميل لإلغاء بعضها البعض. كيف إذاً يمكن للضغط أن ينشئ قوة كلية لا صفرية على جسم، ولماذا يجب أن تكون تلك القوة متجهة نحو الأعلى؟

مبدأ أرخميدس

إن الجسم المغمور جزئياً أو كلياً في مائع يؤثر عليه قوة طفو للأعلى مساوية لوزن المائع المزاح.

بدون الجاذبية ستلغي القوى بعضهما البعض تماماً لأن ضغط المائع الساكن سيكون منتظماً في كل مكان. لكن الجاذبية تتسبب في تقليل ضغط المائع الساكن مع زيادة الارتفاع. على سبيل المثال، إذا لم يتحرك أي شيء، يكون ضغط الهواء تحت جسم دائما أكبر من ضغط الهواء فوقه. وبالتالي يدفع الهواء أسفل الجسم للأعلى بقوة أكبر من دفعه أعلى الجسم للأسفل، وبناء على ذلك يواجه الجسم قوة كلية للأعلى من الهواء – قوة طفو.

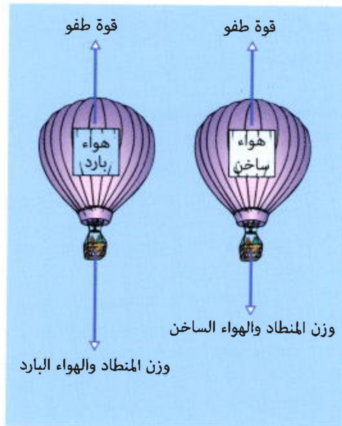
ما هو مقدار قوة الطفو على هذا الجسم؟ تساوي في المقدار وزن المائع الذي أزاحه الجسم. لفهم هذه النتيجة الرائعة، تخيّل استبدال الجسم بجزء من المائع ذاته له نفس الشكل (شكل ٣,١,٥ أ). بما أن قوة الطفو تُبذل من قبل المائع المحيط، وليس من قبل الجسم، فإنها لا تعتمد على تركيب الجسم. فالبالون المليء بالهيليوم سيواجه نفس قوة الطفو التي يواجهها بالون مشابه مليء بالماء أو الرصاص أو حتى الهواء. لذا فإن استبدال الجسم بجزء من المائع له نفس الشكل سيبقي قوة الطفو عليه كما هي دون أي تغيير.



شكل ٣,١,٥: (أ) جزء من الهواء مغمور في الهواء نفسه يواجه قوة طفو للأعلى مساوية لوزنه ولا يتسارع. (ب) الجسم الأثقل من الهواء الذي يزيحه يغطس، بينما (ج) يطفو جسم آخر أخف وزناً من الهواء الذي يزيحه. يمكن أن يُنظر أيضاً لطفو الجسم في المائع أو غطسه من ناحية الكثافة. إن الجسم الذي له كثافة متوسطة أكبر من كثافة المائع المحيط به سيغطس، بينما الذي له كثافة متوسطة أقل سيطفو. فالبالون المليء بالماء، على سبيل المثال، سيغطس في الهواء لأن الماء والمطاط أكثر كثافة من الهواء. إذا ضاعفت حجم البالون، فأنت تضاعف كلاً من وزنه وقوة الطفو المبذولة عليه، لذا سيغطس أيضا. إن الحجم الكلي لجسم أقل أهمية من كثافته بالناسبة لكثافة المائع المحيط به.

لكن جزءاً من السائل معلقاً في مزيد من السائل نفسه لا يتسارع في أي اتجاه؛ فقط يظل هناك، لذا فإن محصلة القوة عليه هي بكل وضوح صفر. هذا الجزء له وزن للأسفل، لكن ذلك الوزن يجب أن يُلغى بقوةٍ ما للأعلى والتي لا يمكن أن تأتي إلا من المائع المحيط. هذه القوة للأعلى هي قوة الطفو، وهي تساوي دائما مقدار وزن الجزء من المائع الذي له نفس شكل الجسم، أي المائع المزاح من قِبل الجسم.

إن مبدأ الطفو هذا يفسر لماذا تطفو بعض الأجسام بينما تغطس أجسام أخرى. الجسم الموضوع في مائع يواجه قوتين: وزنه للأسفل وقوة الطفو للأعلى. إذا كان وزنه أكبر من قوة الطفو، فإنه سيتسارع للأسفل (شكل ٣،١،٥ ب)؛ إذا كان وزنه أقل من قوة الطفو، فإنه سيتسارع للأعلى (شكل ٣،١،٥ ج). وإذا تساوت القوتان، فإنه لن يتسارع على الإطلاق وسيحافظ على سرعة ثابتة.



شكل ٤،١،٥: يحتوي منطاد مليء بالهواء الساخن على جسيمات هواء أقل ويزن أقل من منطاد مليء بالهواء البارد. إذا كان وزن المنطاد أقل بشكل كاف، فإن محصلة القوة على المنطاد ستكون في الاتجاه الأعلى وسيتسارع المنطاد للأعلى.

تحقق من فهمك # ٤: لماذا لا يطفو البشر في الهواء (للإجابة، انظر، صفحة ١٥٧)

إذا أزاح إنسان $0.08m^3$ ($2.8ft^3$) من الهواء، ما هي قوة الطفو التي يواجهها؟

مناطيد الهواء الساخن

بما أن الهواء خفيف جدا، بكثافة مقدارها فقط $1.25kg/m^3$ ($0.078lbm/ft^3$)، فإن أجساماً قليلة تطفو فيه. إن أحد هذه الأجسام النادرة هي منطاد فارغ تماما. بفرض أن ذلك المنطاد له غلاف خارجي رقيق أو غشاء، فإنه سيكون تقريبا عديم الوزن وله كثافة متوسطة قريبة من الصفر. بما أن وزنه المهمل أقل من قوة الطفو للأعلى التي يواجهها، فإن المنطاد الفارغ سيحلق للأعلى بشكل رائع.

لسوء الحظ، لن يدوم المنطاد الفارغ طويلا. بما أنه محاط بضغط الهواء الجوي، فإن كل متر مربع من غشائه سيواجه قوة للداخل مقدارها 100,000N. في ظل عدم وجود أي شيء داخل المنطاد لدعم غشائه ضد هذه القوة الساحقة، فإنه سيتسطح. قد يستطيع الغشاء السميك والصلب تحمل ضغط الهواء المحيط، لكن عندها ستصبح الكثافة المتوسطة للمنطاد كبيرة وسيهبط. لذا فإن المنطاد الفارغ لن ينفع.

الذي سينفع هو منطاد مليء بشيء يبذل ضغطاً على الغشاء للخارج مساوياً للضغط الداخل من قبل الهواء المحيط.

عندها سيواجه كل جزء من الغشاء محصلة قوة صفرية ولن يُسحق المنطاد. يمكننا أن نملأ المنطاد بالهواء الخارجي، لكن ذلك سيجعل كثافته المتوسطة كبيرة جدا. بدلا من ذلك، نحتاج غازاً له نفس ضغط الهواء المحيط لكن كثافته أقل.

أحد الغازات التي لها كثافة أقل من كثافة الضغط الجوي هو الهواء الساخن. إن ملء منطادنا بالهواء الساخن يتطلب جسيمات أقل من ملئها بالهواء البارد، حيث أن كل جسيم هواء ساخن يتحرك أسرع ويساهم أكثر في الضغط الكلي مقارنة بجسيم الهواء البارد. يحتوي منطاد الهواء الساخن على جسيمات أقل، وله كتلة أقل، ويزن أقل مما لو كان يحتوي على هواء بارد. الآن لدينا منطاد عملي بكثافة متوسطة أقل من كثافة الهواء المحيط به. قوة الطفو التي يواجهها هي أكبر من وزنه، فإلى الأعلى يسير (شكل ٤،١،٥).



شكل ٥،١،٥: قاع منطاد الهواء الساخن مفتوح بحيث يمكن للهواء الساخن أن يتدفق للداخل والهواء البارد أن يتدفق للخارج. يزيح الهواء الساخن أكثر من مقدار وزنه من الهواء البارد ويجعل المنطاد أخف وزنا.

بما أن ضغط الهواء داخل منطاد الهواء الساخن مساوٍ لضغط الهواء خارج المنطاد، فإن الهواء لا يميل للتحرك للداخل أو الخارج (قضية سنتعرض لها في القسم القادم)، والمنطاد لا يحتاج أن يُغلق (شكل ٥،١،٥). إن مشعل بروبان كبيراً، موجوداً أسفل فتحة المنطاد، يسخن الهواء الذي يملأ الغشاء. كلما زادت حرارة الهواء في الغشاء قلّت كثافته ونقص وزن البالون. يتحكم طيّار المنطاد بالشعلة، بحيث يكون وزن المنطاد مساوياً

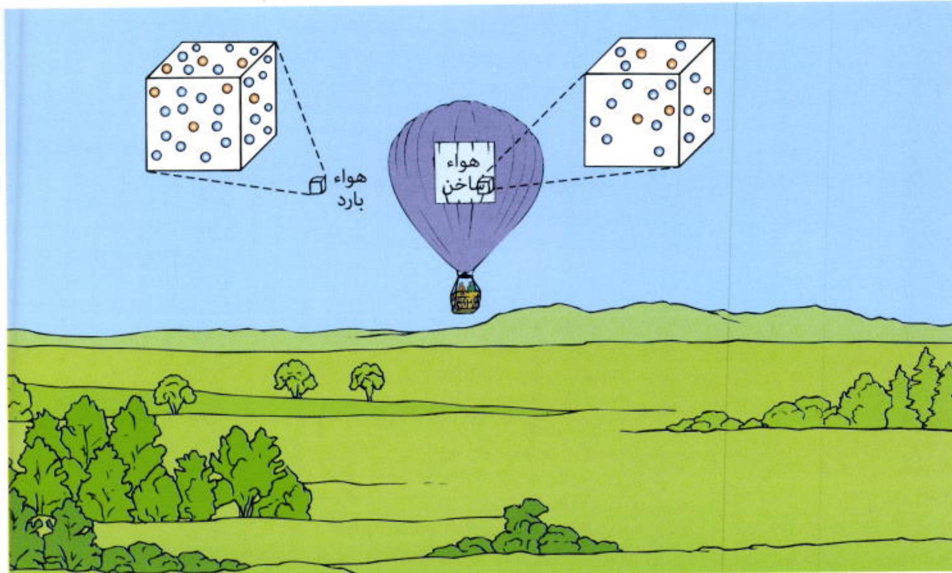
تقريبا لقوة الطفو المؤثرة على المنطاد. إذا رفع طيار المنطاد درجة حرارة الهواء، فإن جسيمات ستغادر الغشاء، وسينقص وزن المنطاد، ويرتفع المنطاد. إذا سمح الطيار للهواء بأن يبرد، ستدخل جسيمات للغشاء، وسيزيد وزن المنطاد، ويهبط.
لكن حتى لو سخّن الطيّار الهواء وجعله ساخناً جدا، فإن المنطاد لن يرتفع للأعلى إلى الأبد. حينما يرتفع المنطاد، فإن الهواء يصبح أخف ويقل الضغط داخل وخارج الغشاء. بالرغم من أن وزن المنطاد ينقص عندما يخف الهواء، إلا أن قوة الطفو عليه تقل بسرعة أكبر، وتصبح أقل كفاءة في رفع حمولتها. عندما يخف الهواء كثيرا فلا يستطيع رفع المنطاد لارتفاعات أعلى، سيصل المنطاد لسقف طيرانه والذي لا يمكنه الارتفاع لأعلى منه، حتى وإن أشعل الطيار الشعلة لأقصى طاقة. إذاً لكل درجة حرارة للهواء الساخن يوجد ارتفاع تحليق والذي عنده سيحوم المنطاد. عندما يصل المنطاد لذلك الارتفاع، فهو في وضع اتزان مستقر. إذا انتقل المنطاد للأسفل لسبب ما، فإن محصلة القوة عليه ستتجه للأعلى؛ إذا انتقل للأعلى، فإن محصلة القوة عليه ستتجه للأسفل.

تحقق من فهمك # ٥: طقس المنطاد (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

هل يمكن لمنطاد الهواء الساخن أن يرتفع أكثر في اليوم الحار أم البارد؟

بالونات الهيليوم

على الرغم من أن الجسيمات في الهواء الساخن والبارد متشابهة، إلا أنه يوجد عدد أقل منها في كل متر مكعب من الهواء الساخن مقارنة بالموجودة في المتر المكعب من الهواء البارد. نسمي عدد الجسيمات في وحدة حجم كثافة الجسيمات، والهواء الساخن له كثافة جسيمات أقل من الهواء البارد (شكل ٦،١،٥). وبما أن لهما جسيمات متشابهة، فإن الهواء الساخن له أيضا كثافة أقل من الهواء البارد ويرتفع للأعلى بواسطة قوة الطفو.
لكن هناك طريقة أخرى لجعل أحد الغازات يطفو في آخر: استخدم غازاً يحتوي على جسيمات خفيفة جدا. ذرات الهيليوم، مثلا، أخف من جسيمات الهواء. عندما يكون لهما نفس الضغط ودرجة حرارة، فإن غاز الهيليوم والهواء لهما أيضاً نفس كثافة الجسيمات. بما أن كل ذرة هيليوم تزن 14 ٪ من متوسط وزن جسيم الهواء، فإن 1 m^3 من الهيليوم يزن فقط 14 ٪ من وزن $1m^3$ من الهواء. لذا فإن بالوناً مليئاً بالهيليوم له فقط جزء من وزن الهواء الذي يزيحه، فترفعه قوة الطفو للأعلى بسهولة.



شكل ٦،١،٥: يحتوي مكعب من الهواء الساخن على جسيمات أقل من مكعب مماثل من الهواء البارد. بما أنه يزن أقل من وزن الهواء البارد الذي يزيحه، فإن الهواء الساخن داخل المنطاد يواجه قوة طفو للأعلى هي أكبر من وزنه.

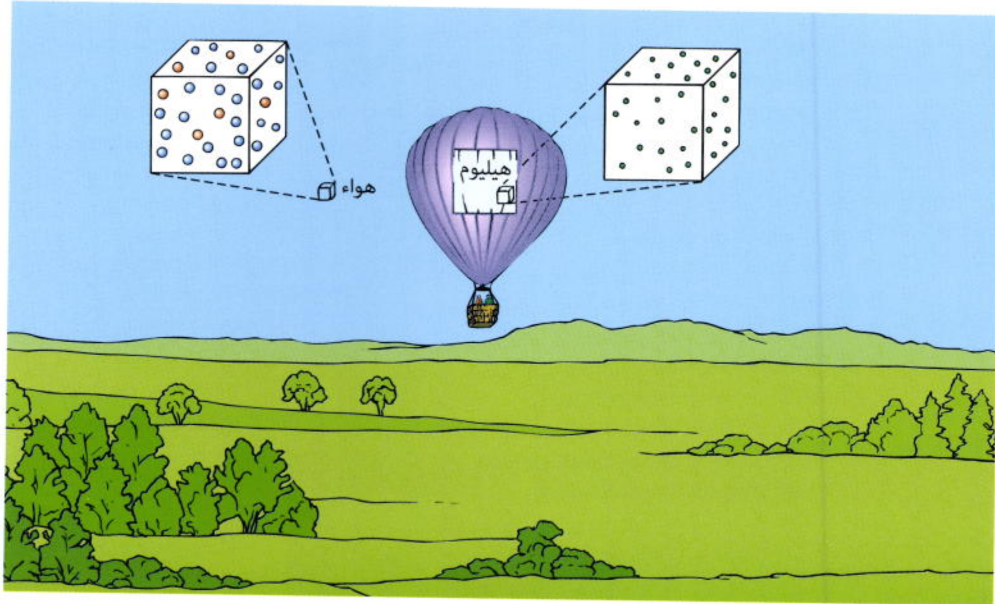
لماذا يجب أن يكون للهواء والهيليوم نفس كثافة الجسيمات عند تساوي ضغطهما ودرجة حرارتهما؟ لأن مساهمة جسيمات الغاز في الضغط لا تعتمد على كتلتها (أو وزنها). عند درجة حرارة معينة، كل جسيم في الغاز له نفس متوسط الطاقة الحركية في حركته الانتقالية، بغض النظر عن كتلته. على الرغم من أن كتلة ذرة الهيليوم أقل بكثير من جسيم هواء، إلا أن ذرة الهيليوم العادية تتحرك بشكل أسرع وترتد أكثر. نتيجة لذلك، يكون لذرات الهيليوم الأقل كتلة والأسرع حركة نفس تأثير الضغط الذي يحدثه جسيمات الهواء الأكثر وزناً والأبطأ حركة.

وهكذا، إذا سمحتَ لذرات الهيليوم داخل منطاد بالانتشار إلى أن تتساوى الضغوط ودرجات الحرارة داخل وخارج المنطاد، فإن كثافة الجسيمات داخل وخارج المنطاد ستكون متساوية أيضا (شكل ٧،١،٥). بما أن ذرات الهيليوم داخل المنطاد أخف وزناً من جسيمات الهواء خارجه، فإن المنطاد سيزن أقل من الهواء الذي يزيحه، وسوف يرتفع للأعلى بواسطة قوة الطفو.

يتناسب ضغط الغاز مع حاصل ضرب كثافة جسيماته بدرجة حرارته المطلقة، كما تشير الصيغة التالية:

الضغط = كثافة الجسيمات × درجة الحرارة المطلقة (٢،١،٥)

ينطبق هذا التناسب بغض النظر عن تركيب الغاز الكيميائي. إن تناسبنا السابق، معادلة (١،١،٥)، كان صحيحاً فقط إذا لم يتغير تركيب الغاز، فتظل الكثافة وكثافة الجسيمات متناسبة لبعضها البعض. لكن الآن لدينا علاقة لها تطبيق أكثر اتساعا.



شكل ٧،١،٥: يحتوي مكعب من غاز الهيليوم على نفس عدد جسيمات مكعب مماثل من الهواء، لكن كل جسيم هيليوم له وزن أقل من جسيم متوسط من الهواء. بما أن الهيليوم يزن أقل من الهواء الذي يزيحه، فإن الهيليوم داخل المنطاد يواجه قوة طفو للأعلى أكبر من وزنه.

إن معادلة (٢،١،٥)، بوجود ثابت تناسب مرتبط بها، تسمى قانون الغاز المثالي. هذا القانون يربط بين الضغط، وكثافة الجسيمات، ودرجة الحرارة المطلقة لغاز جزيئاته مستقلة تماماً عن بعضها البعض. وهو أيضاً دقيق للغازات الحقيقية والتي تتفاعل جزيئاتها مع بعضها بعض الشيء. ثابت التناسب هو ثابت بولتزمان، والذي مقداره

(10^{-23}×1.38 Pa·m^3/particle·K) . باستخدام ثابت بولتزمان، يمكن كتابة قانون الغاز المثالي كمعادلة لفظية:

الضغط = ثابت بولتزمان × كثافة الجسيمات × درجة الحرارة المطلقة (٣,١,٥)

ورمزيا:

$$p = k \cdot \rho_{particle} \cdot T$$

وبلغة الحياة اليومية: لا تحرق علبة الرذاذ. يميل الغاز الساخن والكثيف لتفجير حاويته.

قانون الغازِ المثالي

ضغط الغاز يساوي حاصل ضرب ثابت بولتزمان في كثافة الجزيئات في درجة الحرارة المطلقة.

الهيليوم ليس هو الغاز الوحيد «الأخف من الهواء». غاز الهيدروجين، والذي له نصف كثافة الهيليوم، يستخدم أيضا لجعل المناطيد تطفو. لكن لا تتوقع الهيدروجين أن يرفع ضعف الوزن الذي يرفعه الهيليوم. إن مقدرة المنطاد للرفع هي الفرق بين قوة الطفو للأعلى التي يواجهها ووزنه للأسفل. على الرغم من أن الغاز في منطاد هيدروجين يزن نصف وزنه في منطاد هيليوم مماثل، إلا أن المناطيد تواجه نفس قوة الطفو. لذا تكون مقدرة منطاد الهيدروجين للرفع أكثر بقليل من منطاد الهيليوم. الفائدة الرئيسية للهيدروجين هي أنه رخيص ووفير، بينما الهيليوم نادر (انظر٥[١]). لكن بما أن الهيدروجين أيضاً قابل للاشتعال بشكل خطر، فيتجنب استخدامه في الحالات التي يكون فيها للأمان أهمية (شكل ٨,١,٥). لكن حتى السفن الهوائية المليئة بالهيليوم يمكن أن يكون لها مشاكل (انظر٥[٢]).

٥[١] نحصل على غاز الهيليوم كحصيلة إنتاج الغاز الطبيعي من خزانات تحت أرضية في الولايات المتحدة، حيث تشكل من خلال الانحلال الإشعاعي التدريجي لليورانيوم وعناصر أخرى غير مستقرة. على الرغم من أن جزءاً من هذا الغاز يخزن للاستخدامات الصناعية والتجارية، إلا أن كثيراً منه يطلق في الجو ببساطة. المصدر الآخر الوحيد للهيليوم هو الغلاف الجوي، حيث يوجد الهيليوم بمستوى خمسة أجزاء في المليون. ما أن تستهلك المخازن الأرضية فإن الهيليوم سيصبح غازاً نادراً وغالياً نسبيا.

تحقق من فهمك # ٦: ما لا تضعه في منطاد

(للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

جزئ ثاني أكسيد الكربون أثقل من جسيم متوسط من الهواء. إذا سكبت غاز ثاني أكسيد الكربون من كوب، ففي أي اتجاه سيتدفق في الهواء، للأعلى أم للأسفل؟

دقق في أرقامك #١: فرقع خارج الثلاجة

(للإجابة، انظر صفحة ١٥٨)

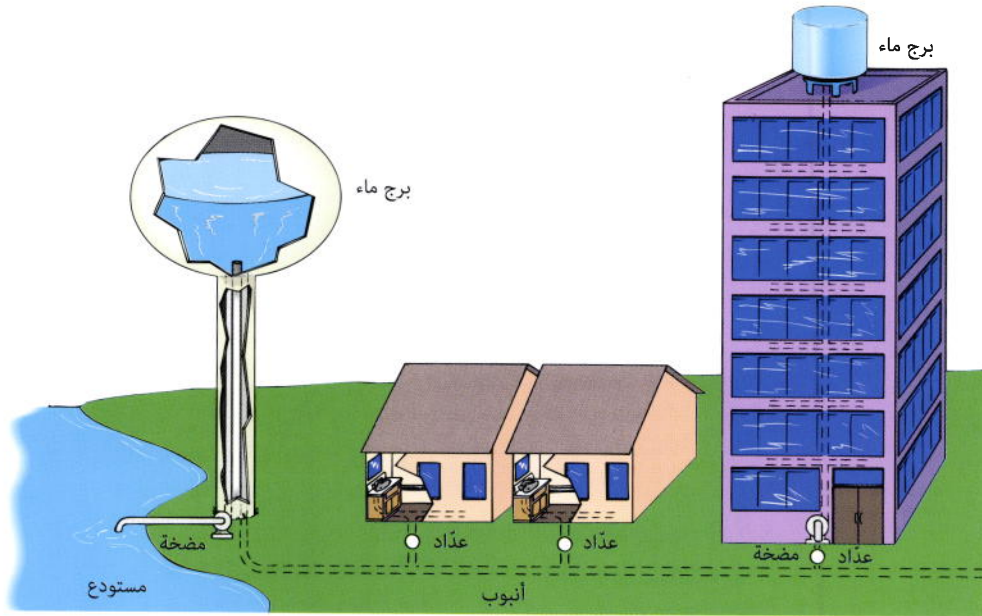
عندما تخرج وعاء بلاستيكياً مليئاً بالهواء من الثلاجة، فإنه يسخن من 2°C إلى 25°C .
ما مقدار تغير ضغط الهواء داخله؟

٥[٢] حتى السفن الهوائية المليئة بالهيليوم كانت تتحطم بسهولة بفعل الطقس السيئ. تحطمت الشيناندوا، وهي إحدى سفينتين هوائية أمريكية مبنية بتصميم ألماني، نتيجة اضطراب الهواء في الثالث من سبتمبر عام ١٩٢٥م، بالقرب من أفا أوهايو. تدفقت الحشود الموجودة في سوق محلي بسرعة فوق الحطام لجمع تذكار.

صور كوربس



شكل ٨,١,٥: سُمّيت السفن الهوائية الصلبة بهذا المصطلح الملائم لأنها في الحقيقة سفن تطفو في الهواء. لسوء الحظ، غاز الهيدروجين الذي يملأ معظم السفن الهوائية، والذي يجعلها خفيفة بدرجة كافية بحيث يستطيع الهواء رفعها، قابل جدا للاشتعال. احترقت الهايدينبرغ في ٦ مايو ١٩٣٧م حينما كانت تحاول الهبوط في ليكهيرست، نيوجرزي. بما أن الهيدروجين يطفو جيدا في الهواء، فإن معظم الاحتراق حدث فوق سفينة الهواء ونجا العديد من الركاب.



٥-٢ توزيع الماء

الآن بعد أن استكشفنا سلوك الأجسام في الموائع، دعنا ننتقل لسلوك الموائع في الأجسام. في هذا القسم، حينما نتفحص كيفية توزيع أنابيب المياه للماء، سنرى أن الضغط، والكثافة، والوزن مهمة في أنابيب المياه مثل أهميتها في البالونات. للمحافظة على تبسيط الأمور، سنركز على أسباب حركة الماء خلال الأنابيب، تاركين معظم التعقيدات المرتبطة بالحركة ذاتها للفصل القادم. على سبيل المثال، سنهمل مؤقتاً مقاومة الهواء واللزوجة وتغيرات الضغط المبهرة التي ترافق حركة المائع.

أسئلة للتفكير

لماذا يكون ضغط الماء أعلى في السرداب منه في العليّة؟ لماذا تتطلب بئر ماء عميقة وضع مضخة في قاعها؟ إذا كان برج المياه هو فقط أداة للتخزين فلماذا يكون طويلاً جدا؟ لماذا يكون لناطحات السحاب أنظمة أنابيب مياه معقدة جداً تشتمل على خزانات في مستويات مختلفة في البناية؟ ما الذي يجعل الماء يتدفق للأعلى إلى فمك من خلال ماصة الشرب؟

تجارب يمكن القيام بها

لرؤية تأثيرات الضغط والوزن على الماء، حاول القيام بهذه التجارب البسيطة بماصة شرب. أولا: «مُصّ» الماء لأعلى ماصة الشرب من كوب لفمك. هل أنت تبذل قوة تجاذب على الماء، أم أن هناك قوة أخرى تدفع الماء للأعلى نـحو فمك؟ بملء ماصة الشرب تماما بالماء، أحكم غلق أعلاها بأصبعك؛ مع إبقاء الإحكام محكماً، أخرج الماصة من الكوب. ماذا يحدث للماء داخلها؟ ماذا يحدث للماء عندما تطلق الإحكام؟ الآن انفخ داخل أحد طرفي ماصة ممتلئة بالماء مع إحكام الطرف الآخر بأصبعك. عندما تطلق إحكام الطرف البعيد، ماذا يحدث للماء؟ ما هي القوى المسؤولة عن هذا التأثير؟

ضغط الماء

تتطلب أنظمة توزيع المياه أمرين: أنابيب المياه وضغط الماء. أنابيب المياه هي التي توصل الماء، وضغط الماء هو الذي يجعل ذلك الماء يبدأ بالتدفق. ضغط الماء مهم لأن الماء، مثل الأشياء الأخرى، له كتلة ويتسارع فقط عند دفعه. إذا لم يكن هناك شيء يدفع الماء عند فتحك للصنبور، فإن الماء ببساطة لن يتزحزح. بما أن الدفع الذي يرسل الماء خلال الأنابيب يأتي أساساً من الاختلافات في ضغط الماء، فإننا نحتاج أن ننظر بعناية لكيفية نشوء مثل ذلك الضغط وكيفية التحكم به.

سوف نبدأ دراستنا لتوزيع الماء بإهمال الجاذبية. كما رأينا في الغلاف الجوي، تُنشئ الجاذبية تدرجات ضغطية في الموائع - توزيعات ضغط تتفاوت باستمرار مع الموقع. يتناقص الضغط مع الارتفاع ويتزايد مع العمق، وهذه التدرجات الضغطية الرأسية تعقّد نظام أنابيب المياه في المدن الجبلية وناطحات السحاب. لكن إذا كانت كل أنابيب مياهنا في منطقة مستوية - مثلا، منزل من طابق واحد في مدينة مستوية جدا - فإن عملنا أبسط بكثير. في ظل عدم وجود أي تغيرات تُذكر في الارتفاع، فيمكننا بأمان إهمال الجاذبية، حيث لا يوجد ماء يدعم وزن ماء يعلوه وتكون تأثيرات الجاذبية أقل ما يمكن.

في هذه الحالة المبسطة، يتسارع الماء فقط استجابة لضغوط غير متوازنة. تماما مثل ما القوى غير المتوازنة تجعل الجسم الصلب يتسارع، فكذلك الضغوط غير المتوازنة تجعل المائع يتسارع. إذا تعرض الماء داخل أنبوب لضغط منتظم في كل أنحائه، فكل جزء من الماء لن يشعر بمحصلة قوة ولن يتسارع؛ إما أن يظل ساكنا أو يتحرك في خط مستقيم بسرعة ثابتة (شكل ١,٢,٥). لكن إذا خرج الضغط عن توازنه، فإن الماء سيتسارع نحو المنطقة ذات الضغط المنخفض.

هذا التسارع لا يعني أن الماء سيبدأ بالحركة فوراً نحو الضغط المنخفض. بسبب قصوره الذاتي، ستتغير سرعة الماء تدريجيا: يزيد سرعته، أو يتباطأ، أو ينعطف جانبا، اعتماداً على موقع الضغط المنخفض. إن ترتيباً معقداً للضغوط المرتفعة والمنخفضة يمكنه أن يوجه الماء خلال شبكة معقدة من الأنابيب، وذلك هو بالضبط ما يحدث ليصل الماء إلى منزلك من محطة الضخ بالمدينة. كل تغير في سرعة الماء أثناء رحلته خلال الأنابيب سببه ضغط غير متوازن.

يمكنك أن تنشئ ضغطاً غير متوازن في الماء ببساطة بالضغط على بعض أجزائه. سيرتفع الضغط في الجزء المضغوط وسيتسارع نحو الضغوط المنخفضة في الأجزاء الأخرى. بما أن هذا النوع من التغير في الضغط لا يسببه حركة الماء، فإنه تغير ساكن في الضغط. لكن حركة الماء نفسه يمكنها أن تؤثر في ضغطه، ومثل هذه التغيرات الحركية في الضغط يمكن أن تكون معقدة ومثيرة. كما سنرى في الفصل القادم، هذه التغيرات تساهم في إحداث تأثيرات متنوعة مثل الرذاذ الخارج من فوهة خرطوم المياه في الحديقة، وقوة الرفع المؤثرة على جناح الطائرة، وانعطاف رمية منعرجة لكرة.

(أ)



(ب)



(ج)



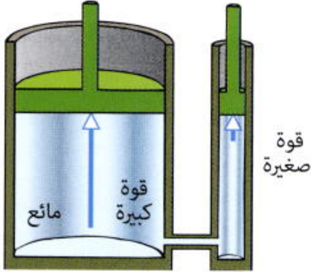
شكل ١,٢,٥ : (أ) إذا تعرض الماء في أنبوب أفقي لضغط منتظم، فإنه لن يتسارع. (ب،ج) لكن إذا كان الضغط على طول الأنبوب غير منتظم، فإن عدم التوازن سينشىء محصلة قوة على كل جزء من الماء وسيتسارع الماء نحو الجانب ذي الضغط المنخفض.

تحقق من فهمك #١: تحت الضغط في الحديقة (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

مع كون صنبور الماء مفتوحاً والفوهة في نهاية خرطوم ماء الحديقة مغلقة بإحكام، فإن الخرطوم ممتلئ بماء ذي ضغط مرتفع. لماذا لا يتسارع هذا الماء؟

إنشاء ضغط ماء بمضخات ماء

لبدء الماء بالتدفق خلال أنابيب المياه في منزل أو مدينة مستوية، ستحتاج مضخة ماء – أداة تستعمل شغلاً ميكانيكياً لتوصيل ماء مضغوط خلال أنبوب. في أبسط مستوياتها، تضغط مضخة الماء جزءاً من الماء لرفع ضغطه المحلي وتستمر في الضغط بينما يتسارع ذلك الماء ويتدفق نـحو مناطق منخفضة الضغط في أماكن أخرى في شبكة الأنابيب.



شكل ٢,٢,٥: القوة التي يبذلها مائع مضغوط على مكبس تتناسب مع مساحة سطح ذلك المكبس. هذه الحقيقة تشكل أساس النظم الهيدروليكية، والتي فيها تضغط قوة صغيرة مبذولة على مكبس صغير سائلاً محصوراً بحيث يبذل قوة كبيرة على مكبس كبير.

لفهم كيفية عمل مضخة، تصور قنينة صودا بلاستيكية مليئة بالماء ومغلقة بإحكام. عندما لا تضغط القنينة، فإن الضغط داخلها هو ضغط جوي ومنتظم (تذكر أننا نهمل الجاذبية). لكن عندما تضغط جوانب القنينة وتدفع للداخل على الماء، فإن الماء يستجيب بالدفع للخارج عليك – قانون نيوتن الثالث – ويقوم بذلك بزيادة ضغطه. كلما دفعت بشدة أكثر، ازدادت شدة دفع الماء العكسية وأصبح ضغطه أكبر.

إن الماء، مثل جميع السوائل، غير قابل للانضغاط – فحجمه لا يتغير عندما يزيد ضغطه – لذا فإن القنينة لن تصغر. لكن يمكن أن يصبح ارتفاع ضغط الماء داخلها كبيراً جدا. إن زيادة الضغط داخل القنينة من الضغط الجوي لضعف ذلك المقدار أو أكثر لا تتطلب قوة هائلة تبذلها بإبهامك على مساحة صغيرة من القنينة.

يتزايد الضغط بانتظام في كافة أنـحاء قنينة الماء، وهذه ملاحظة معروفة بمبدأ باسكال – التغير في ضغط مائع محصور وغير قابل للانضغاط ينتقل لكل أجزاء المائع وأسطح حاويته دون أي فقد. ارتفاع الضغط المنتظم هذا يؤدي لقوة كبيرة للأعلى على غطاء القنينة. لو كان الغطاء أوسع وله مساحة سطحية أكبر، فإن القوة للأعلى عليه قد تكون كبيرة بما يكفي لقلعه من القنينة. هذا التأثير هو أساس النظم الهيدروليكية والمصاعد، حيث الضغط الناتج في مائع غير قابل للانضغاط بفعل قوة صغيرة مبذولة على مساحة صغيرة من وعاء المائع ينتج قوة كبيرة مبذولة على مساحة كبيرة من وعاء المائع (شكل ٢,٢,٥). وهو يفسر أيضا لماذا يكون لقنينات المشروبات البلاستيكية في الغالب أغطية صغيرة ولماذا القنينات البلاستيكية ذات الفتحات المتسعة مناسبة أكثر للحلويات والكعك والمكسرات.

مبدأ باسكال

التغير في ضغط مائع محصور وغير قابل للانضغاط ينتقل لكل أجزاء المائع وأسطح حاويته دون أي فقد.

جاء وقت إزالة الغطاء عن قنينة الماء. الآن عندما تضغط القنينة وتزيد من ضغط الماء الموضعي، يستطيع الماء أن يتحرك. حينما يرتفع ضغط الماء داخل القنينة، يبدأ الماء بالتسارع نـحو الضغط المنخفض فوق فتحة القنينة والنتيجة هي نافورة. أنت تضخ الماء!

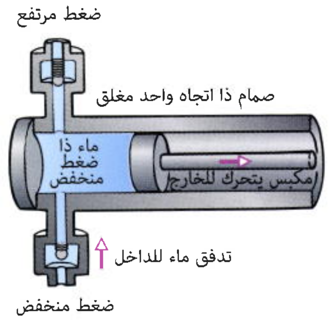
أنت أيضاً تقوم بشغل: حينما يتدفق الماء خارج القنينة، تتحرك يداك للداخل. بما أنك تدفع على الماء للداخل والماء يتحرك للداخل، فأنت تقوم بشغل على الماء. تقوم المضخات بشغل عندما توصِل الماء المضغوط، والماء المضغوط يحمل معه طاقة مرتبطة مع ذلك الشغل.

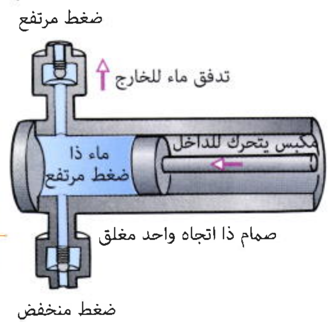
مع أنه يمكن أن تعمل قنينة الماء كمضخة لبعض الوقت، لكنها سريعاً سينفد ماؤها. تظهر مضخة عملية أكثر في شكل (٣،٢،٥). في هذه المضخة، ينزلق مكبس ذهاباً وإياباً في النهاية المفتوحة لأسطوانة مجوفة، صانعاً سدادة ماء محكمة. إن الدفع للداخل على ذلك المكبس يضغط أي ماء في الأسطوانة ويرفع ضغط الماء الموضعي. يبدأ الماء بالتدفق.

لكن على النقيض من قنينتنا البسيطة، فأسطوانة هذه المضخة من السهل إعادة تعبئتها. في الحقيقة، للأسطوانة فتحتان، لكل منهما صمام يسمح للماء بالتدفق في اتجاه واحد فقط. يستطيع الماء الخروج من الأسطوانة فقط من خلال الفتحة العلوية ولا يمكن أن يدخل إلا من خلال الفتحة السفلية فقط.

حينما تدفع مكبس المضخة داخل الأسطوانة المليئة بالماء، يرتفع ضغط الماء في الأسطوانة ويتسارع الماء ويتدفق خارجاً من خلال الصمام العلوي. حينما تسحب مكبس المضخة خارج الأسطوانة المليئة بالماء، ينخفض ضغط الماء داخل الأسطوانة ويتسارع الماء ويتدفق للداخل من خلال الصمام السفلي.

في الحقيقة، حينما تسحب المكبس، ينخفض الضغط داخل الأسطوانة لأقل من الضغط الجوي، بحيث حتى الماء في خزان مفتوح قريب سيتسارع نحو الفراغ الجزئي في الأسطوانة ويعيد ملأه.





شكل ٣،٢،٥: يضخ الماء من منطقة ضغط منخفض لمنطقة ضغط مرتفع بواسطة مضخة مكبس تبادلي. (أ) حينما يُسحب المكبس للخارج، يتدفق الماء لداخل الأسطوانة من منطقة الضغط المنخفض. (ب) حينما يُدفع المكبس للداخل، تنغلق فتحة الصمام ذي الاتجاه الواحد ويندفع الماء خارج الأسطوانة وإلى منطقة الضغط المرتفع.

تحقق من فهمك # ٢: تشغيل مضخة الماء (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

أيهما في العادة يتطلب شغلاً أكثر: سحب مكبس مضخة الماء لخارج الأسطوانة أم إعادة دفعه للداخل؟

نقل الماء: الضغط والطاقة

يمكن للمضخة في الشكل (٣،٢،٥) أن تسحب ماءً ذا ضغط منخفض من بحيرة وتملأ خرطوماً بماء ذي ضغط مرتفع. إذا كان طرف الخرطوم الآخر مفتوحاً، فإن الماء سيتسارع نحو الضغط المنخفض في ذلك الطرف وسيكون له طاقة حركية كبيرة حينما يُرش خارج الخرطوم. من أين تأتي هذه الطاقة الحركية؟

تأتي الطاقة منك ومن المضخة. حينما تدفع المكبس للداخل، ضاغطاً الماء ودافعاً له ليخرج من خلال الصمام العلوي، فأنت تقوم بشغل على الماء لأنك تبذل قوة للداخل على سطح الماء ويتحرك الماء للداخل. إن مقدار الشغل الذي تقوم به يساوي حاصل ضرب ضغط الماء في حجم الماء الذي تضخه. هذه العلاقة البسيطة بين الشغل والضغط والحجم تنشأ لأن القوة للداخل التي تبذلها على الماء بواسطة المكبس تساوي ضغط الماء مضروباً في مساحة سطح المكبس، ولأن المسافة التي يتحركها الماء في اتجاه تلك القوة تساوي حجم الماء المُضخ مقسوماً على مساحة سطح المكبس. القوة مضروبة بالمسافة تساوي الشغل.

حينما تضخ الماء، فإنه يُرش خارج الخرطوم المفتوح. الطاقة التي تجعل الماء يتسارع خارج الخرطوم تتحرك في الحقيقة خلال الماء مباشرة من المضخة لنهاية الخرطوم. بما أن الماء غير قابل للانضغاط، ففي كل مرة يخرج لتر من الماء من المضخة، يخرج أيضاً لتر من الماء من الخرطوم. مع أنه في الحقيقة لا يختزن الماء أي طاقة على الإطلاق، فإن المضخة تُعطي كل لتر من الماء مقداراً معيناً من الطاقة عند مغادرته الخرطوم لذا يمكننا تخيل أن هذه الطاقة مرتبطة بالماء وليس بالمضخة. نحن ننشئ خيالاً مفيداً: طاقة الضغط الكامنة. الماء الواقع تحت ضغط له طاقة ضغط كامنة مساوية لحاصل ضرب حجم الماء بضغطه.

بما أن طاقة الضغط الكامنة تأتي في الحقيقة من المضخة، فإنها تختفي بمجرد أن تقطع الصلة بين الماء والمضخة: لا يمكنك المحافظة على قنينة ماء ذي ضغط عالٍ وتتوقعه أن يحتفظ بتلك الطاقة الكامنة. إن

مفهوم طاقة الضغط الكامنة له مغزى فقط إذا تدفق الماء بحرية بحيث أن الماء الخارج من الأنابيب يُستبدل بسرعة؛ عندها أي طاقة تخرج من الأنابيب كطاقة حركية في الماء يعاد وضعها في الأنابيب بواسطة المضخة. في الحقيقة، تفاصيل المضخة ليست بأهمية الفكرة أن الماء المتحرك خلال الأنابيب يُستبدل فورا بمزيد من الماء له نفس الضغط. طالما أن الماء يتدفق بثبات، فيمكنك بأمان استخدام مفهوم طاقة الضغط الكامنة، حتى وإن كنت لا تدري أين المضخة أو كان هناك واحدة في الحقيقة.

إن طاقة الضغط الكامنة لها أكبر دلالة في تدفق حالة-الاستقرار - الحالة التي يتدفق فيها المائع خلال بيئة ساكنة بشكل مستمر وثابت ودون البدء في الحركة أو التوقف عنها أو تغيير أي من خصائصه في أي موضع. تستطيع أن تعلم أنك تشاهد تدفق حالة-الاستقرار عندما لا تستطيع إدراك مرور الوقت في المائع أو بيئته. فالماء المرشوش بثبات خارج خرطوم، وهبوب الرياح بلطف عبر وجهك الساكن، وتدفق تيار مائي لطيف في نهر هادئ كلها حالات من تدفق حالة-الاستقرار في الموائع.

بدون جاذبية، تكون الطاقة الموجودة في حجم محدد من الماء في حالة تدفق مستقر مساوية لمجموع طاقة ضغطه الكامنة وطاقته الحركية. لقد رأينا سابقاً أن طاقة الضغط الكامنة هي حاصل ضرب حجم الماء في ضغطه. طاقة الماء الحركية معطاة في المعادلة (١,٢,٢) كنصف حاصل ضرب كتلته بمربع سرعته. بما أن كتلة الماء هي كثافته مضروبة بحجمه، فإن هذا المجموع هو:

الطاقة = الطاقة الحركية + طاقة الضغط الكامنة (١,٢,٥)

= الحجم . الضغط + $\frac{1}{2}$ × الكثافة × الحجم × (السرعة)^2

إذا قسمنا طرفي هذه العلاقة على الحجم المستخدم، يمكننا أن نحصل على شكل آخر مفيد من هذه العلاقة:

(٢,٢,٥)

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\text{طاقة الضغط الكامنة}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{الطاقة الحركية}}{\text{الحجم}} = \text{الضغط} + \frac{1}{2} \times \text{الكثافة} \times \text{السرعة}^2$$

حينما يتحرك كل حجم من الماء مع التدفق، فإنه يُستبدل سريعاً بحجم جديد من الماء. بما أن التدفق في حالة مستقرة، فإن الطاقة الموجودة في الحجم الجديد من الماء يجب أن تكون تماماً مثل الطاقة الموجودة في الحجم الذي سبقه؛ وهكذا فإن الطاقة الموجودة في كل حجم من الماء المتدفق عبر مسار محدد لا بد أن تكون متماثلة. المسار المحدد الذي يأخذه حجم من الماء يسمى خط الانسياب، والطاقة-لكل-حجم من المائع على طول خط الانسياب ثابتة:

(3.2.5)

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\text{طاقة الضغط الكامنة}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{الطاقة الحركية}}{\text{الحجم}} = \text{الضغط} + \frac{1}{2} \times \text{الكثافة} \times \text{السرعة}^2$$

= ثابت (على طول خط الانسياب)

المعادلة (٣,٢,٥) تسمى معادلة برنولي، نسبة لعالم الرياضيات السويسري دانيال برنولي (انظر[٥]) والذي قاد عمله لتطويرها، على الرغم من أن عالم الرياضيات السويسري ليونارد أويلر (١٧٠٧-١٧٨٣) هو الذي أكملها في الحقيقة.

بما أن الطاقة محفوظة، فإن المائع غير القابل للانضغاط مثل الماء والذي في حالة تدفق مستقر يمكنه أن يستبدل الضغط بالسرعة أو السرعة بالضغط حينما يتدفق على طول خط الانسياب. حينما يتسارع الماء خارجاً من خرطوم بفوهة، على سبيل المثال، فإن ضغطه ينخفض لكن سرعته تزيد لأنه يحوّل طاقة الضغط الكامنة إلى طاقة حركية. وحينما يُرشّ ذلك الماء المتحرك على سيارة تغسلها، فإنه يتباطأ لكن ضغطه يزيد لأنه يعيد تحويل طاقته الحركية لطاقة ضغط كامنة. في كلتا الحالتين، طاقة الماء الكلية ثابتة.

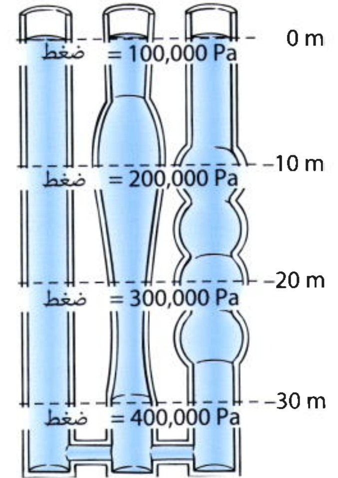
[٥] كأستاذ في باسيل، درّس دانيال برنولي (عالم رياضيات سويسري، ١٧٠٠-١٧٨٢م) ليس فقط الفيزياء، بل أيضاً علم الأحياء، والتشريح، وعلم وظائف الأعضاء. لقد اقترح اقتراحاً صحيحاً بأن الضغط الذي يبذله غاز على جدار حاويته ينتج من عدد لانهائي من تصادمات جسيمات صغيرة جدا تكوّن هذا الغاز. كما أنه اشتق علاقة مهمة جداً بين الضغط والحركة وارتفاع المائع - معادلة برنولي.

تحقق من فهمك # ٣: كيف تنمو حديقتك؟ (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

الماء في خرطوم حديقتك له ضغط كبير ويتقوس عدة أمتار في الهواء أثناء سقاية نباتاتك. ما هو ضغط الماء في الماء الساقط بعد أن يغادر نهاية الخرطوم؟

الجاذبية وضغط الماء

تُنشئ الجاذبية تدرّجاً ضغطياً في الماء: كلما زاد عمق الماء، زاد الوزن الذي يعلوه وزاد الضغط. بما أن الماء أكثر كثافة من الهواء، يزداد ضغط الماء بسرعة مع العمق. في أنبوب رأسي مفتوح من الأعلى، ضغط سطح الماء هو الضغط الجوي (حوالي 100,000Pa)، ولكن عند 10m (33ft) فقط تحت سطح الماء، يكون الضغط قد تضاعف ليصل 200,000Pa. عند ذلك العمق البسيط، يزن الماء الذي يعلوه نفس وزن الهواء الذي يعلوه، مع أن سماكة الغلاف الجوي عدة كيلومترات.



شكل ٤,٢,٥: يتزايد ضغط الماء الساكن في أنابيب مع العمق بحوالي 10,000Pa لكل متر من العمق. شكل الأنابيب لا يهم. في الأنابيب المفتوحة من الأعلى والمتصلة بالقرب من القاع، كما هو موضح هنا، سيميل الماء للتدفق إلى أن يتوحد ارتفاعاته في كافة أنحاء الأنابيب.

إن شكل الأنبوب لا يؤثر على العلاقة بين الضغط والعمق. مهما كانت الأنابيب معقدة، فإن ضغط الماء الساكن في داخلها يزداد مع العمق بمقدار 10,000Pa لكل متر أو 10,000Pa/m (شكل ٤,٢,٥). هذا الضغط التدرجي المنتظم ينشئ قوة طفو للأعلى على أي شيء مغمور في الماء. في الواقع، قوة الطفو تلك هي ما يدعم الماء ذاته (شكل ٥,٢,٥).

إن اعتماد ضغط الماء على العمق له عدد من التداعيات المهمة في توزيع الماء. أولا: ضغط الماء في قاع أنبوب طويل هو أكبر بكثير من ضغطه عند قمة الأنبوب نفسه. بناء على ذلك، إذا وفّر أنبوب واحد فقط الماء لناطحة سحاب، فإن ضغط الماء في الطابق الأرضي سيكون مرتفعاً بشكل خطر بينما الضغط في الشقة التي في السطح بالكاد سيكون كافياً لاستحمام مُرْضٍ. لذلك يجب على البنايات العالية أن تتعامل مع ضغط الماء بعناية جيدة؛ لا يمكنهم ببساطة أن يوفروا الماء لكل طابق مباشرة من نفس الأنبوب.

ثانيا: الضغط في مركز الماء الرئيسي في مدينة يقوم بأكثر من مجرد تسريع الماء خارج رأس الدّش؛ فهو أيضاً يدعم الماء في أنابيب البنايات ذوات الطوابق المتعددة. إن رفع الماء للطابق الثالث ضد قوة الجاذبية للأسفل يتطلب قوة كبيرة للأعلى، وتلك القوة يوفرها ضغط الماء. كلما أردت رفع الماء لمكان أعلى، احتجت لمزيد من ضغط الماء في قاع الأنابيب. رفع الماء يتطلب أيضا طاقة، والتي غالباً ما توفرها مضخة ماء.

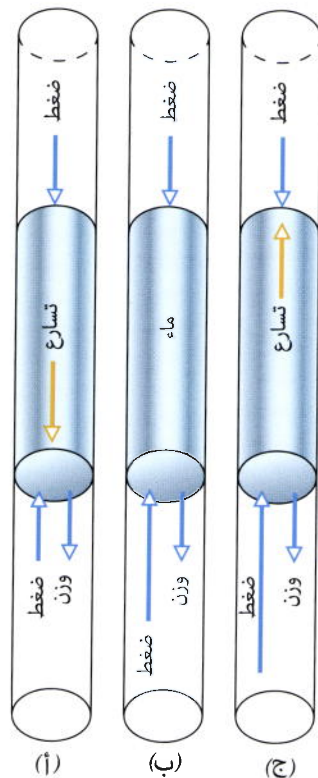
ثالثا، حينما يتحرك الماء أعلى وأسفل شوارع مدينة جبلية، فإن ضغطه يتغير مع الارتفاع. في الأودية يمكن للضغط أن يكون كبيراً جداً، وفي قمة الهضاب يمكن أن يكون الضغط صغيراً جدا. لذا يجب أن تكون مراكز الماء الرئيسية في الأودية قوية جداً لتتجنب الانفجار. الضغط العالي في الوادي مفيد جداً لأنه يساعد في دفع الماء رجعياً لمنحدر على الجانب الآخر من الوادي (شكل ٦,٢,٥).
ومع هذا، فإن المدينة الجبلية يجب أن يكون لها محطات ضخ وأنظمة أخرى تتحكم في ضغط الماء في كافة الأنحاء من أجل أن توفر ضغوط ماء معقولة لكل البنايات، بغض النظر عن ارتفاعاتها.

عدا تلك الأنظمة المتحكمة بالضغط، كثيراً ما تشتمل حتى أنابيب المدينة الجبلية على تدفق حالة الاستقرار ويمكن تفسيرها باستخدام صيغة من صيغ قانون برنولي والتي تتضمن الجاذبية. لكن قبل أن نستكشف ذلك الموضوع، دعنا ننظر لتدفق الحالة غير المستقرة والذي يحدث عندما يكون للماء في جزء معزول من الأنبوب أسطح حرة يمكنها أن تتحرك للأعلى أو للأسفل.

بإذن من مصلحة المياه والطاقة بمدينة لوس أنجليس



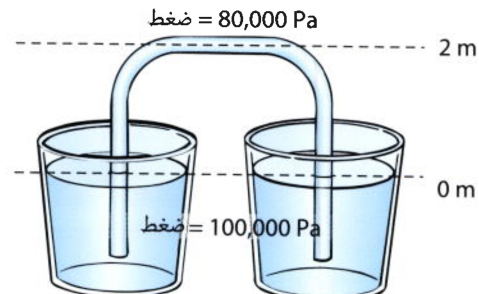
شكل ٦،٢،٥: تتلقى لوس أنجليس معظم مائها من وادي أوينز، والذي يبعد 300km للشمال منها. يتغلب الماء على الجبال والهضاب بين الموقعين بدفع الجاذبية وحدها. تسمح الأنابيب العملاقة بزيادة الضغط أثناء التحرك لأسفل المنحدرات من أجل أن يُدفع الماء لأعلى المنحدرات لاحقا. تدعم بعض أجزاء قناة الـ ١٩١٣م ضغطاً كبيراً بحيث يجب أن يكون سمك الأنابيب الفولاذية المستخدمة فيها أكثر من بوصة.



شكل ٥،٢،٥: عندما يوجه الأنبوب رأسيا، تؤثر الجاذبية على حركة الماء في الأنبوب. (أ) إذا لم يتغير ضغط الماء مع العمق، سيتسارع الماء للأسفل (يسقط) بسبب وزنه. (ب) إذا زاد ضغط الماء مع العمق بمعدل 10,000 Pa/m، فإن الماء لن يتسارع. (ج) إذا زاد ضغط الماء مع العمق بأكثر من ذلك المقدار، فإن الماء سيتسارع للأعلى.

الحالة الأبسط هي الأنابيب المفتوحة في الأعلى، بحيث تكون كل الأسطح الحرة للماء عند ضغط جوي. مثل أي جسم، يتسارع الماء في الاتجاه الذي يُخفض طاقته الكامنة الكلية بأسرع ما يمكن. ومع عدم وجود مساهمة من الأنابيب غير المتحركة أسفل الماء ولا من ضغط الهواء المنتظم فوقه لأي طاقة كامنة، فإن الطاقة الكامنة الوحيدة للماء هي بسبب الجاذبية ويتسارع الماء بالاتجاه الذي يخفض تلك الطاقة الكامنة الجذبية بأسرع ما يمكن.

إذا كان السطح الحر للماء مرتفعاً في مكان أكثر من آخر، فإنه يمكنه أن يخفّض متوسط ارتفاعه وبالتالي طاقة جذبه الكامنة وذلك بالسماح لمائه المرتفع من تعبئة أدنى أوديته. بعد بعض التحرك في مواضع عدة، يهدأ الماء ليصل لاتزان مستقر بحيث تصبح جميع أسطحه الحرة مستوية وبدون أي ارتجاج وعند ارتفاع واحد متماثل. مهما كانت الأنابيب معقدة، فإن الماء المفتوح للهواء من الأعلى دائما «يبحث عن مستواه». إن التدفق الطبيعي المرتبط بتأثير الاستواء هذا كثيراً ما يستخدم في توصيل الماء (انظر◊). لكن إذا أغلقت جزءاً من الأنابيب المعزولة وخفضت الضغط فوق أحد أسطح الماء الحرة، فإن ذلك السطح سيرتفع لمستوى أعلى من جميع الأسطح الأخرى. سوف يرتفع إلى أن يستبدل الضغط المضاف الناتج من عامود الماء الأطول بالضغط المفقود فوق سطح الماء الحر. كلما انخفض الضغط فوق ذلك السطح، وجب أن يرتفع الماء أكثر لتعويض ذلك الضغط المفقود. هذا التأثير هو ما يرفع الماء في ماصة الشرب ويسمح له بالتحرك بين حاويتين مفتوحتين لكي «يبحث عن مستواه» من خلال أنبوب مرتفع يعرف بالسيفون (شكل ٧،٢،٥).



شكل ٧،٢،٥: وعاءان من الماء مفتوحان مرتبطان بسيفون. يسمح هذا الأنبوب ذو شكل حرف U للماء بالتدفق إلى أن يتساوى مستوياه في كلا الوعائين. يسمح الأنبوب القوي لضغط الماء في السيفون بالانخفاض لأدنى من مستوى الضغط الجوي.

ولكن إزالة كل ضغط الهواء فوق سطح الماء الحر داخل ماصة طويلة أو سيفون سوف ترفع الماء تقريباً لارتفاع 10m (33ft) فقط فوق مستوى الماء في موضع آخر في حاوية مفتوحة. حتى لو لم يكن هناك أي ضغط فوق السطح المفتوح، فإن هذا العمود الذي طوله 10m من الماء المرتفع يستبدل تماماً ضغط الهواء المفقود وبالتالي يمنع الماء في الأنابيب الأخرى من رفعه لارتفاع أكبر. لذا من المستحيل سحب ماء من بئر عميقة بمجرد إنزال أنبوب لتلك البئر وتخفيض ضغط الهواء فيه: لن يرتفع الماء لأكثر من 10m. بدلاً من ذلك، يجب ربط مضخة بقاع الأنبوب لتزيد من ضغط الماء وتدفعه خلال طول الأنبوب إلى أن يصل قمته.

تحقق من فهمك # ٤: ما هو ضغط الماء؟ (للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

إذا تم توصيل كل الماء لناطحة سحاب ارتفاعها 400m بواسطة أنبوب واحد، ما مقدار زيادة ضغط الماء في الطابق الأرضي عنه في الطابق العلوي؟

نقل الماء مرة أخرى: الجاذبية

كما رأينا، يتطلب وجود ضغط وطاقة لرفع ماء للطابق الثالث من بناية. يمكننا الآن تعميم تعبيرنا حول حفظ الطاقة في الموائع التي تتدفق في حالة الاستقرار ليضم الجاذبية وطاقة الجذب الكامنة.

إن طاقة الجذب الكامنة للماء تساوي وزنه مضروباً في ارتفاعه (القوة اللازمة لرفعه مضروبة بالمسافة التي تم رفعه إليها)، وطاقة جذبه الكامنة-لكل-حجم هي وزنه-لكل-حجم مضروبا في ارتفاعه. بما أن وزنه-لكل-حجم هو كثافته مضروبة في تسارعه بسبب الجاذبية، فإن طاقة جذب الماء الكامنة-لكل-حجم هي كثافته مضروبة في تسارعه بسبب الجاذبية وفي ارتفاعه.

إذا ضممنا طاقة الجذب الكامنة في معادلة (٢,٢,٥) وأدركنا أن الطاقة-لكل-حجم ثابتة للموائع في حالة تدفق مستقر على طول خط الانسياب، فيمكننا الحصول على علاقة يمكن كتابتها كمعادلة لفظية: (٤,٢,٥)

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\text{طاقة الجذب الكامنة}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{الطاقة الحركية}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{طاقة الضغط الكامنة}}{\text{الحجم}}$$

= الارتفاع × التسارع بسبب الجاذبية × الكثافة + (السرعة)^2 × الكثافة × $\frac{1}{2}$ + الضغط

= ثابت (على طول خط الانسياب)

ورمزيا: $p + 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h$ = ثابت على طول خط الانسياب

وفي لغة الحياة اليومية: عندما يتسارع تدفق الماء في فوهة أو يتدفق صعوداً للأعلى في أنبوب، فإن ضغطه ينخفض.

هذه هي نسخة معدلة من معادلة برنولي، والتي تتضمن الجاذبية. تصف هذه المعادلة بشكل صحيح تدفق حالة الاستقرار في خطوط انسياب متغيرة الارتفاع.

معادلة برنولي

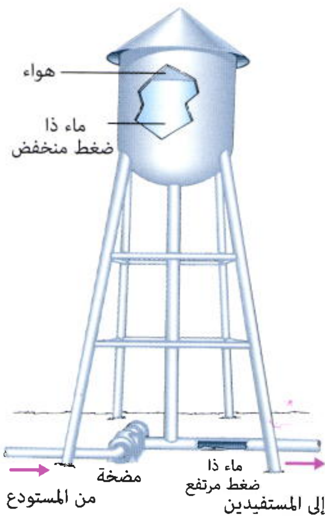
لمائع غير قابل للانضغاط يتدفق في حالة استقرار، فإن مجموع طاقة ضغطه الكامنة، وطاقته الحركية، وطاقة جذبه الكامنة ثابت على طول خط الانسياب. تعبر المعادلة (٥,٢,٤) عن هذا القانون.

بما أن الطاقة محفوظة، فإن المائع غير القابل للانضغاط مثل الماء والذي في حالة تدفق مستقر يمكنه أن يُبادل سرعته وضغطه وارتفاعه مع بعضها البعض. لذا حينما يتدفق الماء للأسفل، فإن سرعته أو ضغطه أو كلاهما

يزيد؛ إذا سقط من صنبور مفتوح، فإن سرعته تزيد؛ وإذا هبط بثبات داخل أنبوب منتظم، فإن ضغطه يزيد. يحدث العكس عندما يصعد الماء للأعلى. إن الماء الصاعد من نافورة يفقد سرعة أثناء ارتفاعه بينما الماء الصاعد بثبات في أنبوب منتظم يفقد ضغطاً أثناء صعوده.

هذه القابلية للتبادل بين الارتفاع والضغط والسرعة تجعل من الممكن إحداث ضغط في الأنابيب بتوصيل عمود طويل من الماء بالأنابيب. لهذا فإن المدن والتجمعات السكنية وحتى المباني المنفردة لها أبراج ماء (شكل ٨،٢،٥). يُبنى برج الماء في موقع مرتفع نسبياً ضمن المنطقة التي يخدمها. تعبئ مضخةٌ برجَ الماء بالماء، ثم تحافظ الجاذبية على ضغط عالٍ ثابت في كافة أنحاء الأنابيب المتصلة به (شكل ٩،٢،٥). يكون الماء في قمة برج الماء عند الضغط الجوي، لكن الضغط في القاع أعلى بكثير؛ عند قاعدة برج ماء يرتفع 50m، على سبيل المثال، يبلغ الضغط حوالي 600,000Pa أو ستة أضعاف الضغط الجوي.

إضافة إلى توفير ضغط ثابت في أنابيب الماء الرئيسية، فإن برج الماء يُخزّن الطاقة بكفاءة ويمكنه أن يوصل تلك الطاقة بسرعة. عندما يُسحب الماء من برج الماء، تصبح طاقة جذبه الكامنة عند القمة طاقة ضغط كامنة عند القاع. يحل برج الماء محل المضخة، بتوفير تدفق ماء ثابت بضغط مرتفع ثابت تقريبا. لكن على خلاف المضخة، يمكن لبرج الماء توفير هذا الماء ذي الضغط المرتفع بمعدل سريع جدا. طالما أن مستوى الماء لا ينخفض بشكل كبير، فإن الماء ذا الضغط المرتفع يستمر في التدفق.



شكل ٨،٢،٥: العديد من المباني في مدينة نيويورك لها أبراج ماء على أسطحها. هذه الأبراج تحافظ على ضغط الماء في الأنابيب وتساعد في مكافحة الحرائق.

تحقق من فهمك # ٥: قدرة الماء

(للإجابة، انظر صفحة ١٥٧)

طاقة كهرومائية تستخرج طاقة من الماء الهابط من خزّان مرتفع من خلال أنبوب. في الخزّان، هذه الطاقة تأخذ شكل طاقة جذب كامنة. قبل محطة الطاقة مباشرة، ما هو الشكل الذي تتخذه الطاقة؟

دقق في أرقامك #١: فوق أو خارج

(للإجابة، انظر صفحة ١٥٨)

إذا كان ضغط الماء عند مدخل مبنى هو 1,000,000Pa، فلأي ارتفاع يمكن أن يصل الماء داخل المبنى وما هو مقدار سرعة تدفقه من صنبور عند مدخل المبنى؟ (كتلة لتر من الماء داخل الأنبوب هي 1kg.)

ستيف لويس/اميج باند/ صور جيتي



شكل ٩،٢،٥: يستخدم برج الماء وزن الماء لتكوين ضغط مائي كبير جدا بالقرب من الأرض. كلما زاد ارتفاع البرج، زاد الضغط بالقرب من الأرض. يتمكن برج الماء من المحافظة على ضغط الماء بطريقة كامنة ولا يتطلب ضخاً مستمراً. حتى أثناء فترات ذروة استهلاك الماء، فإنه يُبقي الضغط مستقراً إلى حد ما. عندما ينخفض مستوى الماء في برج الماء لأقل من مستوى معين، فإن المضخة تعيد ملأه.

خاتمة الفصل الخامس

في هذا الفصل درسنا بعض المفاهيم الأساسية المرتبطة بالموائع. في قسم البالونات، استكشفنا مفهوم الضغط والطريقة التي ينظم ويدعم بها ضغط الهواء الغلافَ الجوي للأرض. رأينا أن زيادة ضغط الهواء تحت جسم ما ينتج قوة طفو للأعلى على ذلك الجسم، وأن قوة الطفو هذه يمكنها أن تجعل الأجسام تحلق، مثل مناطيد الهواء الساخن أو الهيليوم، والتي كثافتها أقل من كثافة الهواء المحيط بها.

في قسم توزيع الماء، فحصنا كيف أن ضغط الماء يتسبب في تسريع الماء خلال الأنابيب، من الضغط المرتفع إلى الضغط المنخفض. بعدها ركّزنا على طرق إنتاج ضغط الماء، إما بالمضخات أو بالجاذبية. وبدراسة أشكال الطاقة في الماء، سِقنا لمعادلة برنولي، والتي تصف التحوّل الداخلي لطاقة المائع بين طاقة الضغط الكامنة، والطاقة الحركية، وطاقة الجذب الكامنة. على الرغم من أن تطبيقات معادلة برنولي الأكثر إثارة ما زالت أمامنا، إلا أننا قمنا باستخدامها لفهم التغيرات في الضغط والسرعة المصاحبة لحركة الماء صعوداً وهبوطاً في الأنابيب والنوافير.

التفسير: الغوّاص الديكارتي

يطفو الغوّاص لأن كثافته المتوسطة، أي كتلة القنينة ومحتوياتها مقسومة على الحجم الذي يشغله هاذان الجزءان، هي أقل من كثافة الماء. بما أن قوة الطفو للأعلى على الغوّاص تتجاوز وزنه للأسفل، فإن الغوّاص يطفو للأعلى نـحو قمة القارورة. عندما يبدأ الغوّاص بالبروز خارج الماء، فإنه يزيح ماءً أقل وهواء أكثر وتقل قوة الطفو التي يواجهها. في النهاية سوف يواجه محصلة قوة صفرية ويطفو دون تسارع على سطح الماء.

عندما تضغط قارورة الصودا، فأنت تزيد من الضغط داخلها. بما أن الماء غير قابل للانضغاط، فإن كثافته لا تتغير بارتفاع الضغط. ولكن فقاعة الهواء داخل القنينة مضغوطة وتأخذ مساحة أقل داخل القنينة. يتدفق الماء لداخل القنينة ويزيد من الكثافة المتوسطة للقنينة ومحتوياتها. عندما تتجاوز كثافة الغوّاص المتوسطة كثافة الماء أخيراً، فإن الغوّاص يغطس.

لإبقاء الغوّاص عائماً في الماء، يجب أن تعدّل ضغط الماء حتى تصبح الكثافة المتوسطة للغوّاص مساوية تماما لكثافة الماء. من المستحيل القيام بهذا التعديل دون النظر إلى الغوّاص. حتى الزيادة الطفيفة أو النقصان لهذا الضغط سيتسبب في انجراف الغوّاص ببطء للأعلى أو للأسفل.

ملخص الفصل

كيفية عمل البالونات

يطفو منطاد الهواء الساخن لأن وزنه الكلي (السلة، والغشاء، والهواء الساخن) أقل من وزن الهواء البارد الذي يزيحه. بتسخين الهواء داخل الغشاء بإشعاله، فإن الطيّار يقلل من كثافته. حينما يسخن الهواء، يتطلب عدداً أقل من الجسيمات لملء الغشاء، والجسيمات الفائضة تتدفق خارج الغشاء من خلال الفتحة في أسفله، ويصبح المنطاد أخف.

إن بالون الهيليوم أيضاً يزن أقل من الهواء الذي يزيحه. لكن وزنه الأقل يرجع سببه لخفة وزن ذرات الهيليوم المنفردة، والتي يقل وزن كل واحدة منها عن وزن جسيم الهواء الذي تستبدله بكثير. فبملء بالون بالهيليوم، ينخفض وزن البالون بشكل كبير. وبما أن قوة الطفو المبذولة على البالون من الهواء المحيط تتجاوز وزن البالون، فإن البالون يتسارع صعوداً للأعلى.

كيفية عمل توزيع الماء

يبدأ توزيع الماء عندما تنقل المضخة ماءً ذا ضغط منخفض من الخزّان إلى أنابيب ذات ضغط مرتفع. على طول مسار مستوٍ، يتسارع الماء نـحو مناطق لها ضغط أقل، مثل فتحة خرطوم أو رأس دُش. يسمح عدم توازن الضغط للماء بالتغلب على المنعطفات في الأنابيب في طريقه إلى غايته. أثناء سيره، يمكن أن يرتفع أو ينخفض ارتفاع الماء؛ وعند ذلك يتغير ضغطه، فينخفض الضغط عندما يتحرك الماء للأعلى ويزيد عندما يتحرك الماء للأسفل. في المناطق المنخفضة، حيث يمكن أن يكون ضغط الماء عالياً جداً لا يمكن استخدامه مباشرة، قد يكون من اللازم إضافة منظم ضغط للأنابيب. في المناطق المرتفعة، حيث يمكن أن يكون ضغط الماء منخفضاً جداً لا يمكن استخدامه بشكل عملي، قد يكون من اللازم إضافة مضخة إضافية لرفع ضغطه.

قوانين ومعادلات مهمة

١. مبدأ أرخميدس: إن الجسم المغمور جزئياً أو كلياً في مائع تؤثر عليه قوة طفو للأعلى مساوية لوزن المائع المزاح.

٢. قانون الغاز المثالي: ضغط الغاز يساوي حاصل ضرب ثابت بولتزمان في كثافة الجسيمات في درجة الحرارة المطلقة، أو:

الضغط = ثابت بولتزمان × كثافة الجسيمات × درجة الحرارة المطلقة (٣،١،٥)

٣. مبدأ باسكال: التغير في ضغط مائع محصور وغير قابل للانضغاط ينتقل لكل أجزاء المائع وأسطح حاويته دون أي فقد.

٤. معادلة برنولي: لمائع غير قابل للانضغاط يتدفق في حالة استقرار، فإن مجموع طاقة ضغطه الكامنة وطاقته الحركية وطاقة جذبه الكامنة ثابت على طول خط الانسياب، أو (٤،٢،٥)

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\text{طاقة الجذب الكامنة}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{الطاقة الحركية}}{\text{الحجم}} + \frac{\text{طاقة الضغط الكامنة}}{\text{الحجم}}$$

= الارتفاع . التسارع بسبب الجاذبية . الكثافة + السرعة^2 × الكثافة $\frac{1}{2}$ + الضغط

= ثابت (على طول خط الانسياب)

تحقق من فهمك - الإجابات

٥-١ البالونات

١. ضغط الهواء.

لماذا: بما أن الحيز بين الكوب الماص والجدار فارغ، فالضغط هناك صفر. يبذل الضغط في الهواء المحيط قوى كبيرة للداخل على كلٍّ من الجزء الخارجي للكوب والجدار، فيضغطهما على بعضهما. طالما أنه لا يوجد أي هواء بينهما يقوم بالدفع للخارج، فإن الكوب والجدار يظلان متصلين بإحكام. ما أن يتسرب هواء لداخل الكوب الماص، فإنه بسهولة ينفصل من الجدار.

٢. ضغط الهواء المحصور في الوعاء يزداد مع زيادة درجة الحرارة، متسبباً في انتفاخ الغطاء للخارج.

لماذا: كلما تتغير درجة حرارة غاز محصور، فإن حجمه أو ضغطه أو كلاهما يتغير أيضا. في هذه الحالة، تسخين الهواء المحصور في الوعاء يتسبب في زيادة ضغطه. الضغط غير المتوازن داخل وخارج الوعاء يتسبب في تقوس الغطاء للخارج أو حتى الانفتاح بفرقعة.

٣. حينما يتغير ارتفاعك، يتغير الضغط الجوي.

لماذا: الهواء داخل أذنيك محصور، لذا فإن درجة حرارته وكثافته وضغطه ثابتة في العادة. حينما يتغير ارتفاعك، فإن الضغط خارج أذنك يتغير فتواجه طبلة أذنك محصلة قوة. تتقوس طبلة الأذن للداخل أو الخارج، فتكتم الأصوات التي تسمعها متسببة بعدم ارتياح. يتم تخفيف عدم الارتياح نتيجة عدم توازن الضغط أثناء البلع، حين يمكن للهواء أن يتدفق لداخل أو خارج طبلة الأذن.

٤. حوالي 1N (0.22lbf).

لماذا: يبذل الهواء قوة طفو عليه مساوية لوزن الهواء الذي يزيحه. كثافة الهواء بالقرب من مستوى الماء هي حوالي $1.25kg/m^3$، لذا فإن $0.08m^3$ من الهواء له كتلة 0.1kg تقريباً ($1.25kg/m^3$ مضروباً في $0.08m^3$) ووزن حوالي 1N. لذا فإن قوة الطفو للأعلى المبذولة عليه هي حوالي 1N. قوة الطفو هذه الناتجة من الهواء هي حقيقية وتقلل من الوزن الذي تقرأه عند وقوفك على ميزان أرضي بحوالي0.125 %.

٥. يمكن أن يرتفع أكثر في اليوم البارد.

لماذا: في اليوم البارد، يكون الهواء الخارجي كثيفاً نسبياً وقوة الطفو على المنطاد أكبر مما هي عليه في اليوم الساخن. سيبرد الهواء الساخن في المنطاد بشكل أسرع في اليوم البارد، لكن المنطاد سيكون قادراً على رفع حمولة أكبر. تطير الطائرات أيضاً بشكل أفضل في الأيام الباردة.

٦. سيتدفق للأسفل.

لماذا: إن ثاني أكسيد الكربون، والذي يوجد في المشروبات الغازية والجليد الصلب وطفايات الحريق، هو أثقل من الهواء لأن جزيئاته أثقل من جسيمات الهواء. ثاني أكسيد الكربون الذي تسكبه من الكوب له نفس ضغط ودرجة حرارة الهواء المحيط به وبالتالي نفس كثافة الجسيمات. لكن كل جزيء من ثاني أكسيد الكربون يزن أكثر، لذا فإن ثاني أكسيد الكربون هو الغاز ذو الكثافة الأعلى (له كثافة كتلة أكبر) ويتدفق للأسفل في الهواء. هذا الميل للتدفق نحو الأرضية يجعل من ثاني أكسيد الكربون وسيلة مفيدة لإطفاء النيران المنخفضة بمنع وصول الأكسجين لها.

٥-٢ توزيع الماء

١. ضغط الماء (القوة على وحدة مساحة سطح) داخل الخرطوم منتظم في كافة الأنحاء، لذا لا يواجه الماء أي محصلة قوة وبالتالي لا يتسارع.

لماذا: في غياب الجاذبية، تتسارع الموائع فقط إذا واجهت عدم توازن في الضغط. بما أن الماء في كافة أنحاء الخرطوم عند نفس الضغط، فلا يوجد أي عدم اتزان في الضغط وبالتالي لا يوجد أي تسارع. عند فتحك للفوهة، فإن الضغط عند ذلك الطرف من الخرطوم ينخفض ويتسارع الماء باتجاهه.

٢. دفعه للداخل في الغالب يتطلب شغلاً أكثر.

لماذا: عندما تسحب المكبس لخارج الأسطوانة، فأنت تحرك الهواء بعيداً وتُنشئ فراغاً جزئياً داخل الأسطوانة. يتطلب هذا العمل مقداراً متواضعاً من الشغل لأن الهواء لا يدفع بشدة على ظهر المكبس، والضغط الناتج من الماء المتدفق لداخل الأسطوانة يعينك في السحب. لكن عند دفعك المكبس لداخل الأسطوانة، فأنت تزيد ضغط الماء. اعتماداً على ضغط الماء عند مخرج الخرطوم، فإن الماء في الأسطوانة قد يبذل قوة كبيرة جداً على المكبس. في تلك الحالة، يجب عليك القيام بشغل كبير جداً على الماء أثناء دفعك المكبس للداخل وإخراج الماء من الأسطوانة.

٣. الضغط الجوي.

لماذا: حينما يتسارع الماء خارجاً من الخرطوم، فإن ضغطه ينخفض. يحول الماء طاقة ضغطه الكامنة لطاقة حركية. ينخفض ضغط الماء إلى أن يصل لضغط الهواء المحيط به، أي الضغط الجوي.

٤. حوالي 4,000,000Pa (40 ضغط جوي) أعلى.

لماذا: وزن الماء داخل الأنبوب سينشئ ضغطاً إضافياً هائلاً بالقرب من قاع المبنى. الماء الخارج من صنبور مفتوح في الطابق الأول عند هذا الضغط الهائل سيتسارع إلى 319km/h (200mph)، كما هو الحال في بعض آلات الغسيل النفاثة وآلات القطع ذات الضغط العالي.

٥. طاقة ضغط كامنة (وبعض من الطاقة الحركية).

لماذا: حينما يهبط الماء داخل الأنبوب، فإن طاقة جذبه الكامنة تتحول لطاقة ضغط كامنة. الماء الذي يصل لمحطة الطاقة يكون تحت تأثير ضغط هائل، وهذا الضغط هو الذي يبذل القوى المطلوبة لإدارة التوربينات التي تشغّل المولّدات. تتطلب إدارة التوربينات شغلا، لذا يتخلى الماء عن معظم طاقته في محطة الطاقة. هذه الطاقة تغادر محطة الطاقة عبر خطوط الطاقة الكهربائية.

دقق في أرقامك - الإجابات

٥-١ البالونات

١. سيزيد بمقدار ٨,٤ ٪.

لماذا: لاستخدام المعادلة (٥,١,٣) لتحديد التغير في الضغط، فإننا نحتاج درجات حرارة مقاسة بالمقياس المطلق، مثل مقياس كالفن. بما أن 0°C هي حوالي 273K، فإن 2°C هي حوالي 275K و25°C هي حوالي 298K. يمكننا كتابة معادلة 5.1.3 مرتين، مرة لكل درجة حرارة:

$$\text{الضغط}_{298k} = \text{ثابت بولتزمان} \times \text{كثافة الجسيمات} \cdot 298k$$

$$\text{الضغط}_{275k} = \text{ثابت بولتزمان} \times \text{كثافة الجسيمات} \cdot 275k$$

كثافة جسيمات الهواء داخل الوعاء لا يمكنها أن تتغير عندما تسخن لأن حجمها ثابت. لذا يمكننا أن نقسم المعادلة العلوية على السفلية ونلغي ثابت بولتزمان وكثافة الجسيمات في الطرف الأيمن:

$$\frac{\text{الضغط}_{298k}}{\text{الضغط}_{275k}} = \frac{298k}{275k} = 1.084$$

هكذا يزيد الضغط داخل الوعاء بمقدار 1.084 تقريبا، أو حوالي 8.4 ٪. هذا الضغط المرتفع سيتسبب في إصدار صوت فرقعة عندما تفتح الوعاء.

٥-٢ توزيع الماء

١. يمكنه أن يصل لارتفاع 100m أو يخرج من الصنبور بسرعة 45m/s (101mph).

لماذا: حينما يتدفق الماء خلال الأنبوب (خط الانسياب)، فإن طاقة ضغطه الكامنة يمكن أن تتحول لطاقة جذب كامنة أو طاقة حركية. في بداية الأمر، كل طاقة الماء هي طاقة ضغط كامنة لذا، من المعادلة (٤,٢,٥)، فإن طاقة الماء-لكل-حجم هي 1,000,000Pa. إذا تدفق الماء صاعداً أعلى الأنبوب، ستصبح تلك الطاقة طاقة جذب كامنة. ويمكننا إعادة ترتيب المعادلة (٤,٢,٥) لإيجاد الارتفاع الذي يمكن أن يصل إليه:

$$\text{الارتفاع} = \frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} \cdot \frac{1}{\text{التسارع بسبب الجاذبية} \times \text{الكثافة}}$$

$$= 1,000,000Pa \cdot \frac{١}{1000\frac{kg}{m} \cdot 9.8m/s^2} = 102m$$

إذا تدفق الماء خارج الصنبور، ستصبح تلك الطاقة طاقة حركية. يمكننا أيضاً إعادة ترتيب المعادلة (٤,٢,٥) لإيجاد السرعة التي يصل إليها:

$$\text{السرعة} = \sqrt{\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} \cdot \frac{2}{\text{الكثافة}}} = \sqrt{\frac{2,000,000Pa}{1000Kg/m^3}} = 45m/s$$

تمارين

١. يطفو بالون مليء بالهيليوم في الهواء. ماذا سيحدث لبالون مليء بالهواء في وسط من الهيليوم؟ لماذا؟

٢. جذع الشجرة أثقل من العصا، لكن كلاهما يطفو في الماء. لماذا لا يؤدي وزن الجذع الأثقل لغطسه في الماء؟

٣. ستطفو سيارة على سطح الماء طالما أنها لا تسمح بالماء بالتسرب لداخلها. بدلالة الكثافة، لماذا يتسبب السماح بدخول الماء للسيارة في غطسها؟

٤. العديد من المخازن تعرض الأغذية المجمدة في صناديق مفتوح أعلاها. لماذا لا يدخل هواء الغرفة الدافئ للصناديق ويذيب الطعام؟

٥. بعض من الألعاب الشفافة تحتوي على سائلين ملوّنين. مهما حاولت إمالة هذه اللعبة، فإن أحد السائلين يظل فوق الآخر. ما الذي يبقي السائل العلوي فوق السائل السفلي؟

٦. عندما تتوقف السيارة التي تركبها فجأة، فإن الأشياء الثقيلة تتحرك نحو مقدمة السيارة. فسر لماذا سيتحرك بالون مليء بالهيليوم نحو مؤخرة السيارة.

٧. يستقر الماء في قاع خزّان بنزين. أيهما سيأخذ حيزاً أكبر: 1kg ماء أم 1kg من البنزين؟

٨. تستقر صلصة السلطة المتكونة من الزيت والخل بطفو الزيت فوق الخل. فسر هذه الظاهرة من خلال الكثافة.

٩. عندما تطفو سمكة بلا حراك تحت سطح النهر، ما هو مقدار واتجاه القوة التي يبذلها الماء عليها؟

١٠. يتحرك بعض السمك ببطء شديد، ومن الصعب التمييز إن كانوا أحياء أم لا. على أية حال، إذا عامت سمكة على ارتفاع متوسط في حوض السمك وليس في قمة الماء ولا قاعه، يمكنك أن تكون متأكداً جداً أنها حية. لماذا؟

١١. البارومتر، والذي كثيراً ما يستخدم لمراقبة الطقس، هو أداة تقيس ضغط الهواء. كيف يمكنك استخدام البارومتر لقياس ارتفاعك أثناء تسلقك الجبال؟

١٢. إذا أغلقت بإحكام قارورة بلاستيكية رقيقة أو قارورة عصير أثناء سيرك في أعالي الجبال ثم عدت للوادي، ستكون القارورة منبعجة للداخل. ما الذي يسبب هذا الانضغاط؟

١٣. العديد من الجرّات لها نقرات في أغطيتها تفرقع عندما تفتح الجرّة. ما الذي يبقي النقرة منبعجة للداخل حينما تكون الجرّة مغلقة بإحكام، ولماذا تفرقع عند فتح الجرّة؟

١٤. إذا وضعت كوباً ساخناً مبللاً مقلوباً رأساً على عقب على منضدة ملساء لبضع ثوان، قد تجد أنه من الصعب رفعه مرة أخرى. ما الذي يمسك بالكوب على المنضدة؟

١٥. تقوم بغلق وعاء بإحكام بعد ملء نصفه بطعام ساخن وتضعه في الثلاجة. لماذا يكون غطاؤه متقوساً للداخل عندما تراه في وقت لاحق؟

١٦. لماذا لا يوجد ترمومتر يمكن أن يقرأ درجات حرارة تصل لـ $-300°C$ ؟

١٧. تستخدم نفَسك لنفخ إطار مطاطي كبير ثم تركبه للتزحلق عليه لأسفل تلة ثلجية. بعد بضع دقائق في الثلج يفقد الإطار انتفاخه. ماذا حدث للهواء؟

١٨. حلوى المارشميلو (الخَطمية) ممتلئة بفقاعات هواء. لماذا تنتفخ المارشميلو عند تحميصها؟

١٩. تتفاخر إعلانات بخاخات المبيدات الحشرية للدبور والزنبور بمقدرتها على توصيل المبيد لمسافات بعيدة. كيف يؤثر الضغط داخل البخاخ على تلك المسافة، ولماذا يكون اتجاه رّش البخاخ مهماً (رأسياً مقابل أفقياً)؟

٢٠. كثيراً ما يُصب الشاي المثلج من دورق كبير له صنبور بالقرب من القاع. لماذا تقل سرعة تدفق الشاي خارج الصنبور حينما يخلو الدورق؟

٢١. لماذا يجب أن يكون سُمك السدود العالية أكثر في قاعدتها منه في قمتها؟

٢٢. الساعات المضادة للماء لها عمق أقصى والتي يمكن السباحة بأمان بها إذا لم يُتجاوز. لماذا؟

٢٣. عندما تقف في مسبح ويصل الماء إلى رقبتك، تجد أن التنفس يصبح أكثر صعوبة بعض الشيء مقارنة بالتنفس لو كنت خارج الماء. لماذا؟

٢٤. كيف يتسبب الدفع على مكبس حقنة في تدفق الدواء لداخل المريض من خلال إبرة مجوفة تعطى تحت الجلد؟

٢٥. لماذا يجب أن يتجاوز الضغط داخل صافرة غلاية الشاي الضغط الجوي قبل أن تبدأ الصافرة بإصدار صوت؟

٢٦. كلما تأخذ نفَساً، يتسارع الهواء نحو أنفك ورئتيك. قارن بين الضغط داخل رئتيك مع ضغط الهواء المحيط أثناء استنشاقك.

٢٧. يمكنك نفخ كيس بلاستيكي بمسكه مرتفعاً ليلتقط الرياح. استخدم معادلة برنولي لتفسير هذا التأثير.

٢٨. عندما يطلق شخص ما جرس إنذار الحريق في ناطحة سحاب، تزيد المضخات من ضغط الماء في جزء المبنى القريب من صندوق ذلك الجرس. كيف يساعد هذا التغير في الضغط رجال المطافئ الذين يحاربون النار؟

مسائل

١. كثافة جسيمات الهواء للضغط الجوي القياسي عند $273.15K$ $(0°C)$ هي $2.687\ particle/m^3 \times 10^{25}$. باستخدام قانون الغاز العام،احسب ضغط هذا الهواء.

٢.. ما مقدار القوة التي يبذلها الهواء على السطح الأمامي لهذا الكتاب؟

٣. إذا ملأت وعاء بالهواء عند درجة حرارة الغرفة $(300K)$، وأغلقت الوعاء بإحكام، ثم سخنت الوعاء لدرجة حرارة $900K$، كم سيكون مقدار الضغط داخل الوعاء؟

٤. ضاغطة الهواء هي آلة تضخ جسيمات الهواء لداخل خزّان. تضيف ضاغطة هواء معينة جسيمات هواء لخزّانها إلى أن تصبح كثافة جسيمات الهواء الداخلي ثلاثين ضعفاً من كثافة جسيمات الهواء الخارجي. إذا كانت درجة الحرارة داخل الخزّان هي نفسها خارجه، قارن بين الضغط داخل الخزّان مع الضغط خارجه.

٥. إذا أغلقت بإحكام وعاءً مليئاً بالهواء عند درجة حرارة الغرفة $(20°C)$ ثم وضعته في الثلاجة $(2°C)$، ما مقدار تغير ضغط الهواء في الوعاء؟

٦. إذا غمرت جذع شجرة كتلته $8kg$ في الماء فأزاح $10kg$ من الماء، ما هي محصلة القوة على الجذع في اللحظة التي تترك فيها الجذع؟

٧. إذا كان وزن قاربك $1200N$، ما مقدار الماء الذي سيزيحه عندما يطفو بلا حراك

على سطح البحيرة؟

٨. كثافة الذهب هي تسعة عشر ضعف كثافة الماء. إذا أخذت تاجاً مصنوعاً من الذهب يزن 30N وغمرته في الماء، ماذا سيكون مقدار قوة الطفو على التاج؟

٩. ما مقدار القوة للأعلى التي يجب أن تبذلها على التاج المغمور المذكور في مسألة 8 لمنعه من التسارع؟

١٠. كيف يمكنك أن تستخدم نتائج المسألتين ٨ و ٩ لتحديد ما إذا كان التاج مصنوعاً من الذهب في الحقيقة بدلاً من النحاس المطلي بالذهب؟ (كثافة النحاس هي تسعة أضعاف كثافة الماء.)

١١. تقوم مدينتك بتركيب نافورة في مركزها. إذا أردنا للماء أن يرتفع 25m (82ft) فوق النافورة، فما مقدار الضغط الذي يجب أن يكون عنده الماء أثناء تحركه ببطء باتجاه الفوهة التي ترشه للأعلى في الهواء؟

١٢. بدلاً من وضع مضخة في النافورة (انظر مسألة ١١)، وضع مهندس المدينة خزّان ماء في أحد المباني المكتبية العالية القريبة. على أي ارتفاع في ذلك المبنى يجب أن يكون الخزّان ليصل ماؤه لارتفاع 25 m عندما يُرّش خارجاً من النافورة؟ (أهمل الاحتكاك.)

١٣. لتنظيف منزلك من الخارج تقوم باستئجار رشاشة ماء صغيرة ذات ضغط عال. توفر مضخة الرشاشة ماء يتحرك ببطء له ضغط 10,000,000Pa (حوالي 150 ضغط جوي). ما هي السرعة التي يمكن أن يتحرك بها الماء إذا أصبحت كل طاقة ضغطه الكامنة طاقة حركية أثناء تدفقه خلال فوهة الرشاشة؟

١٤. عندما يصطدم الماء من الرشاشة المذكورة في مسألة ١٣ بجانب منزلك، فإنه يتباطأ إلى أن يتوقف. إذا لم يكن قد فقد أي طاقة منذ أن غادر الرشاشة، فما هو مقدار ضغط الماء في اللحظة التي يتوقف فيها تماما؟

١٥. للغوص بعيداً عن سطح الماء، يجب على الغوّاصة أن تكون قادرة على تحمّل الضغوط الهائلة. عند عمق 300m، ما هو مقدار الضغط الذي يبذله الماء على هيكل الغوّاصة؟

الموائع والحركة

إنّ الموائع مبهرة عند حركتها. قد يكون الماء والهواء الساكنان ضروريين للحياة، لكنهما أيضاً شيئان بسيطان جدا؛ يتغير ضغطهما فقط من مكان لآخر وحتى هذا التغير يحدده في المقام الأول الجاذبية. لكن اندفاع الأنهار وعصف الرياح، بتنوع سلوك حركتهما بين البساطة والتعقيد، يعدّان أكثر إثارة. وحركة الموائع ليست فقط مثيرة؛ ولكنها مهمة أيضا، حيث أن عالمنا مليء بالأجسام والآلات التي تعمل جزئياً أو كلياً بسبب سلوك موائع متحركة. في هذا الفصل، سننظر للعديد من الحالات التي تساهم حركة الموائع في كيفية عملها.

تجربة: مدفع دوامي

إن الموائع حقيقية؛ فهي توجد مستقلة عن أي مواد صلبة قد تتحرك خلالها. من السهل قبول تلك الفكرة فيما يتعلق بالماء، حيث يمكننا أن نرى أن الماء لا ينتظر مرور قارب خلاله لكي يتحرك بطرق مثيرة. لكن يصعب تصور الهواء بهذه الطريقة لأننا نادراً ما نراه وحده، ما عدا تأثيراته على المباني أو الطائرات أو بشرتنا.

للبدء في رؤية الهواء كشيء ملموس ولتوضيح الإمكانيات الغنية المتوفرة لحركته، ابنِ مدفعاً دوامياً - أداة ترسل حلقات من الهواء تتحرك خلال الحجرة. مع أن المدفع الدواميّ الجيّد يُبنى من طبل كبير أو صندوق، لكن يمكنك بناء نموذج بسيط من صندوق كرتوني فارغ.

بإذن من لوي بلومفيلد



أغلق جميع حواف الصندوق المستطيل الشكل بشريط لاصق، وقص ثقباً دائرياً قطره 5 سنتيمترات (2 بوصة) في مركز أحد الأوجه. لاستخدام مدفعك، فقط انقر بشدة على الوجه الآخر للصندوق. ستقفز حلقات من الهواء من الثقب وتتحرك عبر الغرفة بسرعة حوالي 5m/s (11mph).

على الرغم من أنك لا تستطيع رؤية هذه الحلقات، لكن يمكنك تتبع حركتها بالنظر في تأثيراتها على الأجسام التي تواجهها. يمكنها إطفاء الشموع بسهولة أو تحريك ستائر نافذة خفيفة عبر غرفة صغيرة. إذا نفخ صديقك بعض الحلقات تجاهك، سوف تشعر بالضبط أين تصطدم على وجهك أو قميصك.

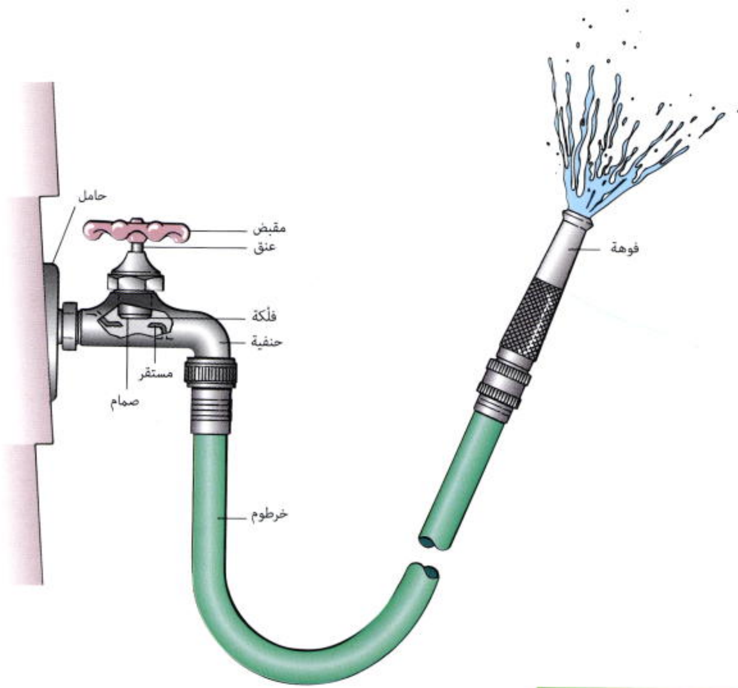
لرؤية هذه الحلقات مباشرة، املأ الصندوق بدخان، أو ضباب، أو غبار. حاول أن تتنبأ ماذا سيكون شكل الحلقات عندما تخرج من الثقب. هل سيكون الدخان في كل حلقة ساكناً، أم هل سيلتف حول الحلقة بأسلوب ما؟ كيف سيعتمد حجم الحلقة وسرعتها على حجم الثقب الذي تخرج منه؟ هل سيعتمد على الشدة التي تنقر بها الصندوق؟ هل سيتغير حجم الحلقة وسرعتها أثناء التحليق؟

الآن انقر الصندوق ولاحظ حلقات الدخان. ما هي الحركات التي تراها؟ قس حجم وسرعة الحلقات أثناء تحليقها. هل تحققت من تنبؤاتك؟ غيّر حجم الثقب وانظر كيف يؤثر هذا التغير على الحلقات وحركتها. كما ترى، يمكن للهواء أن يُحدث بذاته بعضاً من الحركات المعقدة جدا. في هذا الفصل، سوف نفحص كيف أن الهواء والماء والموائع الأخرى المتحركة تؤثر في حياتنا اليومية.

دليل الفصل

بشكل خاص، سوف نستكشف (١) سقاية الحديقة، و(٢) الكرات والهواء، و(٣) الطائرات. في قسم سقاية الحديقة، سوف ننظر في كيفية تغير ضغط الماء وسرعته أثناء تدفقه خلال صنبور، وخرطوم، وفوهة. في الكرات والهواء، سوف نتحرى تأثيرات الهواء على حركات الكرات. أخيرا، في قسم الطائرات، سندرس الطرق التي يدعم بها الهواء المتحرك الطائرات ويدفعها أثناء تحليقها. يمكن إيجاد عرض أكمل لمحتوى الفصل في ملخص الفصل في صفحة ١٩٢.

يواصل هذا الفصل تطوير مفهوم حفظ الطاقة على طول خط انسياب سبق تقديمه في الفصل الخامس. كما أنه يعرض عدة أنواع جديدة من القوى الموجودة عندما تتحرك الموائع مروراً ببعضها البعض أو مروراً بأجسام صلبة. هذه الأفكار موجودة ليس فقط في مواضيع هذا الفصل، بل أيضاً في العديد من النشاطات الشائعة، من غسيل النوافذ باستخدام خرطوم إلى ضخ ماء باستخدام طاحونة.



٦-١ سقاية الحديقة

إن العناية بحديقة زهور كثيراً ما تتطلب سقايتها. في حين كان يعني ذلك في وقت من الأوقات المشي في مسارات الحديقة بدلو الماء، إلا أن الأنابيب الحديثة جعلت مثل هذا المجهود غير ضروري. باستخدام خرطوم وفوهة مرتبطة بالصنبور، يمكنك القيام بمهمتك دون أن تغادر كرسي حديقتك. لكن مع أن الأدوات المطلوبة - صنبور، وخرطوم، وفوهة - بسيطة وغير معقدة، إلا أن المبادئ خلفها ليست كذلك. جميع هذه الأدوات الثلاثة تستخدم قوانين تدفق الموائع بصورة رائعة، فتجعل الفتحات والقنوات تتحكم في معدل توصيل الماء وسرعته بحيث أنه يتقوس برشاقة خلال الهواء لأبعد مسافة يصل لها في حديقتك.

أسئلة للتفكير:

أين يكون الماء عندما يكون الصنبور مغلقا، ولماذا يبدأ بالتدفق خلال الخرطوم عندما تفتح الصنبور؟ ما الذي يحدد المعدل الذي يتدفق به الماء من الصنبور أو الخرطوم؟ إذا سال العسل بدل الماء خلال الخرطوم، كيف سيؤثر ذلك على التدفق؟ لماذا يصدر الماء صوتاً عندما تقوم برش حديقتك به؟ لماذا تجعل الفوهة الماء يرش أسرع ويصل لمسافة أبعد؟ لماذا تصدر الأنابيب صوت قعقعة أحياناً عندما تغلق الصنبور فجأة؟

تجارب يمكن القيام بها:

افتح صنبوراً تدريجياً وانظر للماء عندما يبدأ بالتدفق. ما الذي يدفع الماء خارج الصنبور؟ ما الذي يحدث لمعدل تدفق وسرعة الماء عندما تزيد من فتح الصنبور؟ انظر تحت أو خلف الصنبور وحاول أن تحدد كيف يدخل ويخرج الماء من الصنبور. متى تسمع تدفق الماء؟

اربط خرطوماً بالصنبور. هل يتدفق الماء بنفس السرعة من النهاية المفتوحة كما تدفق من الصنبور وحده؟ غطّ معظم نهاية الخرطوم المفتوحة بإبهامك وشاهد الماء يرش خارجاً للهواء. لماذا يقطع الماء مسافة أبعد عندما توقف تدفقه تقريبا؟ هل تشعر بالماء يضغط على إبهامك؟ أوصل فوهة بالخرطوم وانظر كيف يؤثر معدل التدفق على قوة الرش. املأ دلواً بالخرطوم وحده ومرة أخرى باستخدام الفوهة. أيهما يعبئ الدلو أسرع؟

لزوجة الماء

بعد أن جلبنا الماء لمنزلك في الفصل السابق، نحن الآن مستعدون لسقاية حديقتك. ولكن، للوصول إلى حديقتك، يجب على الماء أولا أن يتحرك خلال خرطوم طويل ممتد على أرض مستوية. هل لطول هذا الخرطوم أي تأثير على عملية توصيل الماء؟ الإجابة هي نعم، فبالعموم توصل الخراطيم الطويلة ماء أقل. لكن، بناء على ما تعلمناه في الفصل الخامس، يجب أن يتحرك الماء خلال خرطوم مستقيم ومستوٍ بسرعة ثابتة وضغط ثابت، ويجب أن لا يهم طول ذلك الخرطوم. بالتأكيد لقد أغفلنا شيئاً مهماً: الاحتكاك. إن الماء المتحرك لا ينزلق بحرية خلال خرطوم ساكن. في الواقع، إنه يواجه قوى احتكاك تعارض حركته النسبية مع الخرطوم.

لكن هذا الاحتكاك غير عادي لأن معظم الماء في الخرطوم لا يلمس الخرطوم ذاته في الحقيقة. إذا كان الماء الموجود عميقاً داخل الخرطوم سيواجه أي قوى بسبب الحركة النسبية، فإن هذه القوى يجب أن تحدث داخل الماء ذاته. يجب على الماء أن يبذل قوى احتكاك على نفسه!

كما هو متوقع، يواجه الماء قوى احتكاك داخلية. تسمى هذه القوى قوى اللزوجة – قوى تظهر كلما حاولت طبقة من مائع أن تنزلق على طبقة أخرى من ذلك المائع. تعارض قوى اللزوجة الحركة النسبية ويمكنك ملاحظة تأثيراتها بسهولة عندما تسكب العسل من جرة. إن العسل عند سطح الجرة ملتصق هناك بقوى كيميائية ويظل ساكنا. لكن حتى العسل البعيد عن جدران الجرة لا يمكنه التحرك بسهولة؛ إذ يواجه العسل قوى لزوجة حينما يحاول التحرك نسبياً للعسل المجاور. بما أن العسل مائع «سميك» أو لزج، تعمل قوى اللزوجة بكفاءة لإبقاء جميع العسل متحركاً تقريباً بنفس السرعة. بما أن العسل عند الجدران لا يستطيع أن يتحرك، تميل قوى اللزوجة لمنع حركة أي من العسل.

جدول ١,١,٦ اللزوجة التقريبية لعدد من الموائع

المائع	اللزوجة*
الهيليوم (2K)	0Pa·s
الهواء (20°C)	0.0000183Pa·s
الماء (20°C)	0.00100Pa·s
زيت الزيتون (20°C)	0.084Pa·s
الشامبو (20°C)	100Pa·s
العسل (20°C)	1000Pa·s
الزجاج (540°C)	1012Pa·s

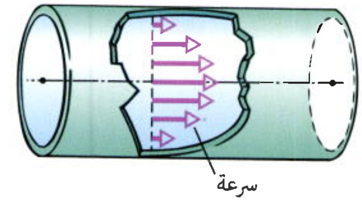
* الباسكال-ثانية (اختصاراً Pa·s ويرادف kg/m·s) هي وحدة اللزوجة في النظام العالمي SI. إن الجزء الفائق الميوعة فقط من سائل الهيليوم الفائق البرودة له لزوجة صفرية.

إن الماء ليس بسماكة العسل (جدول ٦,١,١)، لذا فهو أقل مقاومة للحركة النسبية. مقياس هذه المقاومة للحركة النسبية داخل المائع يسمى لزوجة، ولزوجة الماء هي أقل منها للعسل. في الحقيقة، إذا سخنت الماء فستقل لزوجته أكثر وبالتالي يتدفق بسهولة أكبر. ومن المعتاد في معظم السوائل، أن هذا النقص في اللزوجة مع ارتفاع الحرارة يعكس النشأة الجزيئية لقوى اللزوجة: تلتصق الجزيئات في السوائل ببعضها، مكوّنة روابط كيميائية ضعيفة والتي تتطلب طاقة لكسرها. في السائل الساخن، يكون للجزيئات طاقة حرارية أكبر، فتكسر هذه الروابط بسهولة أكبر لكي تتمكن من عبور بعضها البعض (انظر ٥)

تحقق من فهمك #١: المحافظة على الدفء في يوم عاصف (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

إن كنزة الصوف غير المحاكة جيداً لها العديد من ممرات الهواء الصغيرة جداً بين خيوط الصوف، ومع ذلك فهي تقلل بشكل كبير المعدل الذي يتدفق به الهواء خلالها وصولاً لجلدك عندما تقف في وجه هبوب النسيم. لماذا لا يتدفق الهواء بسهولة خلال الفجوات بين الخيوط؟

٥ يُحمى محرك سيارتك بواسطة زيت المحرك والذي يتم اختيار لزوجته بعناية. إذا كان ذلك الزيت رقيقاً، سيتدفق للخارج من بين الأسطح ولن يمنعها من الاحتكاك ببعضها البعض. إذا كان ذلك الزيت سميكاً جدا، فإن المحرك سيهدر طاقة أثناء تحريك أجزائه خلال الزيت. قبل أعوام، كان لزاماً أن تغير زيت محركك ليناسب الفصل الموسمي. استُخدم زيت وزن 40W السميك في فصل الصيف لأن الطقس الحار جعله أقل سماكة؛ واستخدم زيت وزن 10Wالرقيق في الشتاء لأن الطقس البارد جعله أكثر سماكة. لكن يوجد زيت حديث متعدد التدرج يحافظ على لزوجة ثابتة تقريباً على مدى واسع من درجات الحرارة ولا يحتاج لتغييره مع تغير المواسم. هذا الزيت يحتوي على سلاسل جزيئية صغيرة جدا تتكوّر عند برودتها لكن تتحلّ عند سخونتها. هذه السلاسل تسمك الزيت الساخن بحيث أن زيت 10-40 W يشبه زيت وزن 10 في الشتاء وزيت وزن 40 في الصيف.



شكل ٦,١,١: سرعة الماء المتدفق خلال أنبوب ليست ثابتة عبر الأنبوب. الماء بالقرب من الجدران ساكن، بينما يتحرك الماء عند مركز الأنبوب بأقصى سرعة. الاختلافات في السرعات هي نتيجة قوى اللزوجة.

التدفق في خرطوم مستقيم: تأثير اللزوجة

إن اللزوجة تبطيء من تدفق الماء في الخرطوم. القوى الكيميائية بين الخرطوم والطبقة الأبعد من طبقات الماء تبقي تلك الطبقة من الماء ساكنة، وهذه الطبقة غير المتحركة تبذل قوى لزوجة على طبقة الماء المتحرك داخلها. حينما تتباطأ هذه الطبقة الثانية، تقوم ببذل قوى لزوجة على طبقة أخرى. وهكذا طبقة بعد طبقة، تمسك قوى اللزوجة الماء المتحرك إلى أن يشعر حتى الماء الذي في مركز الخرطوم بتأثيرات اللزوجة التبطيئية (شكل ٦,١,١). على الرغم من أن الماء عند مركز الخرطوم يتحرك أسرع من الماء في أي طبقة أخرى، إلا أنه أيضاً يتأثر بالخرطوم الساكن.

تعرقل قوى اللزوجة هذه توصيل الماء. بدلاً من التحرك بدون جهد خلال الخرطوم المستقيم والمستوي، يحتاج الماء الحقيقي لتدرج ضغطي لدفعه بثبات للأمام. مثل خزانة الملفات المتزحلقة على الرصيف في قسم ٢,٢، يجب أن يُدفع الماء خلال الخرطوم إذا أُريد له المحافظة على تدفق مستمر. وأيضا مثل تلك الخزانة، يصبح الماء أكثر سخونة حينما يُهدر الشغل المبذول لدفعه للأمام ويتحول لطاقة حرارية.

ولكن، على خلاف قوى الاحتكاك الانزلاقي المعتادة - والتي لا تعتمد على السرعات النسبية - تصبح قوى اللزوجة أكبر مع ازدياد السرعات النسبية داخل المائع. يعود ذلك لأنه عند انزلاق طبقتي ماء مروراً على بعضهما البعض بسرعة أكبر، تتصادم جزيئاتها بقوة أكبر وبتكرار أكثر. لذا فإن الماء السريع الحركة والذي يعاني من قوى لزوجة أكبر يهدر طاقة أكثر لكل متر ويحتاج تدرجاً ضغطياً لإبقائه متحركاً بثبات خلال الخرطوم أكبر من الذي يحتاجه الماء البطيء الحركة.
بسبب قوى اللزوجة، يعتمد مقدار الماء المتدفق بثبات خلال خرطوم على أربعة عوامل:

١. يتناسب عكسياً مع لزوجة الماء. كلما زادت لزوجة الماء، صعُب عليه التدفق خلال الخرطوم.
٢. يتناسب عكسياً مع طول الخرطوم. كلما زاد طول الخرطوم، زادت فرصة قوى اللزوجة في تبطئة الماء.
٣. يتناسب مع التغير في الضغط بين فتحة الخرطوم ومخرجه. هذا التغير في الضغط يحدد تدرج الماء الضغطي وبالتالي مقدار شدة دفع الماء للأمام خلال الخرطوم.
٤. يتناسب مع الأس الرابع لقطر الخرطوم. مضاعفة قطر الخرطوم ثلاثة أضعاف توفر للماء تسعة أضعاف الحيز وأيضاً يسمح للماء بالقرب من مركز الخرطوم بالتحرك بتسعة أضعاف السرعة.

يمكننا تحويل جميع هذه العلاقات النسبية إلى معادلة بإضافة الثابت العددي الصحيح (π/128). العلاقة النهائية تسمى قانون بوازيل ويمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

(٦,١,١)

الحجم = (قطر الخرطوم × فرق الضغط . π) / (لزوجة المائع × طول الخرطوم٤ . ١٢٨)

ورمزيا:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot D^4}{\eta \cdot L^4 \cdot 128}$$

وفي لغة الحياة اليومية: من الصعب دفع العسل خلال أنبوب طويل ورفيع.

قانون بوازيل

إن حجم المائع المتدفق خلال أنبوب اسطواني في كل ثانية يساوي (π/128) مضروباً في فرق الضغط (Δp) عبر ذلك الأنبوب مضروباً في قطر الأنبوب للأس الرابع، مقسوماً على طول الأنبوب مضروباً في لزوجة المائع (η).

ليس من المستغرب أن يعتمد معدل التدفق بهذه الكيفية على الفرق في الضغط، وطول الأنبوب، واللزوجة؛ جميعنا قد لاحظ أن ضغط الماء المنخفض أو الخرطوم الطويل يزيد من الوقت اللازم لملء دلو بالماء وأن الشراب اللزج يصب ببطء من قنينة. لكن قد يكون اعتماد معدل التدفق على الأس الرابع لقطر الخرطوم مفاجئاً. حتى التغير الطفيف في قطر الخرطوم يغير بشكل كبير مقدار الماء الذي يوصله ذلك الخرطوم في كل ثانية. خرطوما الحدائق الأكثر شيوعاً في الولايات المتحدة لهما أقطار 5/8in و3/4in ، وفي حين يختلف هذان الخرطومان بما يبدو أنه مقدار مهمل يعادل 20% أو 1.2 من القطر، إلا أن الخرطوم ذا ¾ in يمكنه أن يحمل حوالي 1.24 أو ضعفي الماء الذي يحمله الخرطوم ذو 5/8 in (انظر٥[٢] و ٥[٣])

يمكننا أيضاً أن ننظر لقوى اللزوجة من خلال الطاقة الكلية. بممانعة تدفق الماء خلال الخرطوم، تقوم قوى اللزوجة بشغل سالب عليه وتقلل من طاقته الكلية - الطاقة المذكورة في معادلة برنولي، والتي لا تتضمن طاقة حرارية. إن مقدار الطاقة الكلية بالضبط التي يحتفظ بها الماء يعتمد على سرعة حركته داخل الخرطوم. إذا سمحت للكثير من الماء بمغادرة الخرطوم، فإن الماء سيتحرك خلاله بسرعة ويواجه قوى لزوجة كبيرة. أثناء هذه العملية، معظم طاقة الماء الكلية ستهدر كطاقة حرارية وسيتدفق الماء بلطف من طرف الخرطوم.

لكن إذا قمت بسد فتحة الخرطوم جزئياً بإبهامك وقللت من التدفق، فإن الماء سيتحرك ببطء خلال الخرطوم ويواجه قوى لزوجة أقل. نتيجة لذلك، سيحافظ الماء على معظم طاقته الكلية وسيظل عند ضغط مرتفع عندما يصل لإبهامك. هذا الماء ذو الضغط المرتفع سيتسارع عند ذلك لسرعات هائلة حينما يمرّ خلال الفتحة الضيقة ويُرش خارجاً إلى الهواء.

يمكننا الآن تفسير لماذا تستخدم نظُم توصيل الماء في العادة أوسع الأنابيب والتي تكون أكثر عملية ورخيصة. على خلاف الخرطوم الضيق، يمكن للأنابيب الواسعة حمل كميات كبيرة من الماء مع السماح لذلك الماء بالتحرك ببطء، ومواجهة قوى لزوجة ضعيفة، وهدر القليل من طاقته الكلية. في مثل هذه النظم لتوصيل الماء والتي لها كفاءة في الطاقة، فإن الاحتكاك يكون مهملاً وتتنبأ معادلة برنولي (معادلة ٤,٢,٥) بخواص الماء طوال رحلته بدقة.

تحقق من فهمك #٢: أنابيب الهواء

(للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

إن أنابيب الهواء الطويلة والتي تستخدم لتهوية المنازل والمباني المكتبية لها أقطار كبيرة في العادة. في الغالب، تظهر هذه الأنابيب بالقرب من السقف في المتاجر والمطاعم ذات طراز المخازن الحديث على شكل أنابيب ذات أقطار حوالي 0.5m. لماذا يجب أن تكون أقطار الأنابيب كبيرة جدا؟

دقق في أرقامك #١: الأنابيب القديمة

(للإجابة، انظر صفحة ١٩٤)

عندما كان منزل صديقك جديدا، كان بإمكان صنبور المطبخ أن يوصل 0.5 لتر كل ثانية (0.5L/s). لكن الترسبات المعدنية تراكمت في الأنابيب عبر السنين وخفّضت أقطارها الفعلية بحوالي 20 %. ما مقدار الماء الذي يمكن أن يوصله الصنبور الآن؟

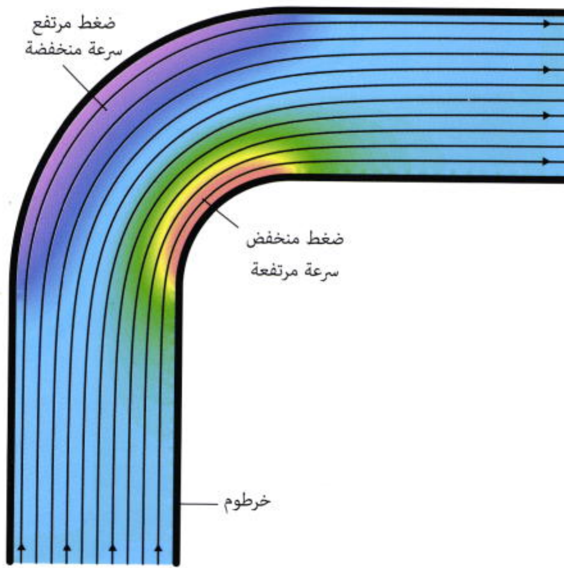
التدفق في خرطوم منحنٍ: تغيرات الضغط الحركية

عند وصول الخرطوم لحديقتك، فإنه ينحني نـحو اليمين والماء المتدفق ينحني معه. يتسارع هذا الماء عند انعطافه، وكما شاهدنا في الفصل الخامس، يتسارع الماء أفقياً فقط استجابة لضغوط غير متوازنة. بما أن الخرطوم ساكن، فإن الضغوط غير المتوازنة داخله يجب أن يكون سببها الماء ذاته؛ إن الماء يواجه تغيرات ضغط حركية.

لفهم تغيرات الضغط الحركية هذه، دعنا نتتبع خطوط الانسياب حينما يعبر الماء هذا الانحناء. على الرغم من أننا للتو قمنا بالتعريف بقوى اللزوجة، إلا أننا سنهملها هنا للتبسيط والتوضيح. مع أن قوى اللزوجة مهمة بالتأكيد في الخرطوم الطويل والضيق، إلا أن الانحناء قصير جدا بحيث يكون تأثير قوى اللزوجة على ما يحدث للماء أثناء عبوره خلاله صغيراً جدا.

٥[٢] لتوصيل كميات كبيرة من الماء بضغط مرتفع أو سرعة مرتفعة، يجب أن يكون لخراطيم إطفاء الحريق أقطار كبيرة. عند ملئها بماء ذي ضغط عال، تصبح هذه الخراطيم الواسعة صلبة وثقيلة، وتجعل من الصعب التحكم بها. الإضافات الكيميائية التي تقلل من لزوجة الماء تسمح لرجال إطفاء الحريق باستخدام خراطيم أضيق وأخف وأكثر مرونة.

٥[٣] يتطلب استخدام أنابيب لها أقطار كبيرة جدا لنقل النفط الخام عبر البرية في ألاسكا. المسافات طويلة والمائع لزج، بالرغم من أنه يتم تسخينه لتقليل لزوجته.



شكل ٢,١,٦: يواجه الماء في خرطوم منحنٍ تغيرات في السرعة والضغط. توضح خطوط الانسياب السوداء المسارات التي يتخذها الماء عند تدفقه حول الانحناء. تشير المسافات بين خطوط الانسياب إلى سرعة التدفق (المسافات المتباعدة هي تدفق بطيء)، ويشير لون الخلفية إلى الضغط (البنفسجي ضغط مرتفع؛ الأحمر ضغط منخفض).

بإهمال قوى اللزوجة، فإن الطاقة الكلية للماء ثابتة على طول كل خط من خطوط الانسياب ويمكننا أن نشاهد تبادلات الطاقة المسموح بها من معادلة برنولي (معادلة ٤,٢,٥). ولكن، بما أن الخرطوم يستند على أرضية مستوية، فإن طاقة جذب الماء الكامنة لا يمكنها أن تتغير والتبادلات الوحيدة التي سنراها هي بين طاقة الضغط الكامنة والطاقة الحركية.

يوضح الشكل (٢,١,٦) نمط تدفق حالة الاستقرار للماء بالقرب من الانحناء. نحن ننظر من الأعلى على الخرطوم في هذا الرسم المحسوب، وكما هو موضح بواسطة خطوط الانسياب السوداء، فإن الماء المتدفق مبدئياً بشكل مستقيم للأمام يتقوس نحو اليمين عند الانحناء وفي النهاية يستمر مباشرة نحو اليمين.

يقترب الماء من الانحناء من خلال مقطع مستقيم من الخرطوم والذي يسير فيه بسرعة ثابتة وله ضغط منتظم. إن سرعته ثابتة لأن الخرطوم المستقيم يوجّه جميع خطوط الانسياب للأمام ولأن الماء المتحرك على طول خط انسياب معين لا يمكنه أن يغيّر سرعته؛ إذا حاول زيادة السرعة، سوف يترك حيزاً فارغاً خلفه؛ إذا حاول التباطؤ سوف يتسبب في «ازدحام مروري». إن ضغط الماء منتظم في كافة أنحاء هذا المقطع المستقيم لأن السرعات الثابتة تعني أنه لا يوجد تسارع وبالتالي لا توجد اختلافات في الضغط.

سرعة الماء الثابتة وضغطه المنتظم موضحان بصرياً في شكل (٢,١,٦). يمكنك أن ترى سرعة الماء المحلية بالنظر في اتجاه وتباعد خطوط الانسياب. تشير خطوط الانسياب دائماً في اتجاه سرعة الماء المحلية والبعد بين الخطوط يتغير عكسياً مع سرعة الماء المحلية. خطوط الانسياب التي تصبح متباعدة أكثر تدل على تناقص السرعة – فالماء الذي يتباطأ ينتشر نحو الجوانب وتتباعد خطوط انسيابه عن بعضها. خطوط الانسياب التي تصبح متقاربة أكثر تدل على زيادة السرعة – فالماء الذي تزداد سرعته يمتد خلال مساره وتتقارب خطوط انسيابه نحو بعضها. بما أن خطوط الانسياب المؤدية للانحناء مستقيمة ومتباعدة بانتظام، فنعلم أن الماء يتحرك على طول كل خط انسياب بسرعة ثابتة.

يمكنك رؤية ضغط الماء المحلي في الشكل (٢,١,٦) بالبحث عن ألوان الطيف. الألوان القريبة من الطرف البنفسجي من الطيف تعني ضغوطاً مرتفعة بينما الألوان القريبة من الطرف الأحمر من الطيف تعني ضغوطاً منخفضة. بما أن الجزء المستقيم له لون أزرق-أخضر منتظم، فهذا يعني أن الماء هناك له ضغط منتظم.

بمجرد أن يبدأ الماء بالانحناء نحو اليمين، فإن سرعاته وضغوطه تبدأ بالتغير. بما أن الماء يتسارع نحو داخل الانحناء،

فلا بد من وجود عدم توازن في الضغط يدفعه في ذلك الاتجاه. كما هو متوقع، يُنشئ تدفق الماء المنحني ضغطاً محلياً مرتفعاً (بنفسجي) بالقرب من الجزء الخارجي للانحناء وضغطاً محلياً منخفضاً بالقرب من الجزء الداخلي للانحناء (أحمر). يصاحب أيَّ انحناء في مسار مائع ضغطٌ غير متوازن مماثل: فالضغط دائما مرتفع في الجزء الخارجي للانحناء مقارنة بالضغط في الجزء الداخلي لذلك الانحناء. ففي نهاية الأمر، عدم توازن الضغط هذا هو ما يسبب انحناء المائع!

الانحناءات وعدم توازن الضغوط

عندما ينحني مسار مائع يتدفق في حالة استقرار، فإن الضغط على الجزء الخارجي من الانحناء يكون دائما أعلى من الضغط على الجزء الداخلي من الانحناء.

لإبقاء الطاقة الكلية ثابتة على طول خط انسياب، فإن كل نقص في ضغط الماء المحلي يصاحبه زيادة في سرعة الماء المحلية والعكس بالعكس. الماء الذي يتقوس في الجزء الخارجي للانحناء يتباطأ (تتباعد المسافات بين خطوط الانسياب) مع ازدياد ضغطه، بينما الماء الذي يتقوس حول الجزء الداخلي للانحناء يتسارع (تضيق المسافات بين خطوط الانسياب) مع انخفاض ضغطه.

حينما يستقيم الخرطوم بعد الانحناء، يعود ضغط الماء وسرعته لما كانت عليه قبل الانحناء. يتسارع الماء في الجزء الخارجي من الانحناء وينخفض ضغطه، بينما يتباطأ الماء الذي في الجزء الداخلي من الانحناء ويرتفع ضغطه. في الجزء المستقيم الذي يلي الانحناء، تصبح سرعة الماء ثابتة مرة أخرى على طول كل خط انسياب وضغطه منتظماً.

قد تبدو هذه التغيرات في الضغط والسرعة غريبة بعض الشيء، ولكنها حقيقية ولها نتائج حقيقية. إذا كان الخرطوم شفافاً وكان بإمكانك أن تضع خيوطاً رقيقة من الصبغة في الماء المتدفق، سوف ترى أن خطوط الانسياب المصبوغة هذه تتقوس حول الانحناء تماما مثل ما هو موضح في الشكل (٢،١،٦). وإذا كان الخرطوم ضعيفاً ولا يستطيع تحمل الضغط المفرط، ففي الأغلب سينفجر عند الجزء الخارجي للانحناء، حيث ضغط الماء هناك أعلى ما يمكن.

قد تتساءل أيهما يتسبب في حدوث الآخر: هل كل تغير في الضغط يتسبب في حدوث تغير في السرعة أم كل تغير في السرعة يتسبب في حدوث تغير في الضغط؟ الإجابة أن كليهما يحدث سوية ويتساويان في الحق بادعائهما سبباً وأثرا. بمجرد أن يستقر نمط تدفق حالة الاستقرار، فإن الماء المتبع لخط انسياب محدد يواجه ارتفاعاً وانخفاضاً في الضغط في نفس الوقت الذي يواجه فيه نقصاً وزيادة في السرعة. ببساطة يسير الاثنان جنباً إلى جنب.

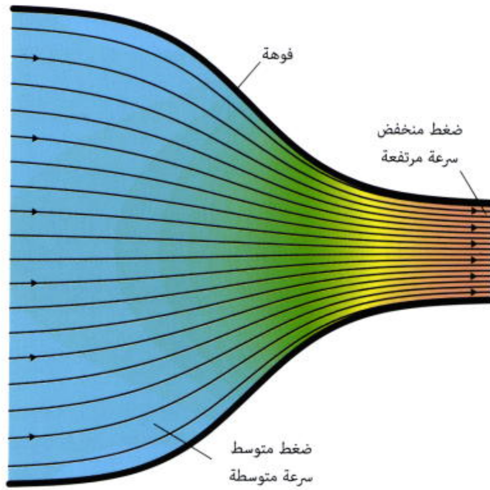
تحقق من فهمك # ٣: غسل قميصك بملعقة (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

أثناء قيامك بغسل الأطباق يتبع سيل الماء الساقط من صنبور المطبخ انحناء ملعقة ويرشّ قميصك. حينما ينحني سيل الماء للأعلى، في أي مكان كان ضغطه أكبر ما يمكن؟

التدفق خلال فوهة: من الضغط إلى السرعة

عندما يتدفق الماء أخيراً من خلال الفوهة عند نهاية الخرطوم، فإنه يبادل طاقة ضغطه الكامنة المتبقية بطاقة حركية ويُرش في الحديقة. قناة الفوهة الضيقة تبدأ عملية تحويل الطاقة هذه بحيث يصبح الماء المنخفض السرعة والمرتفع الضغط الذي يدخل للفوهة ماءً سريع الحركة عند ضغط جوي عند خروجه من الفوهة.

يوضح الشكل (٣،١،٦) أنه عند مرور الماء من خلال الفوهة، تُجمّع القناة الضيقة جميع خطوط الانسياب سوية حتى تزداد سرعتها المحلية. إن الماء الذي يتبع كل خط انسياب يتسارع لكي ينبجس من خلال عنق الفوهة دون أن يتسبب في أي تأخر.



شكل ٣,١,٦: الماء المتدفق خلال فوهة يتسارع وينخفض ضغطه. تشير المسافات الضيقة بين خطوط الانسياب أن سرعة التدفق تزيد بينما يشير تغير اللون من البنفسجي نحو الأحمر أن الضغط ينخفض.

ويرافق هذه الزيادة في سرعة الماء المحلية انخفاض في ضغط الماء المحلي، كما هو موضح بتغير اللون باتجاه الطرف الأحمر من الطيف.

في الوقت الذي يغادر فيه الماء فوهة الخرطوم، يكون ضغطه قد انخفض إلى الضغط الجوي وقد حوّل كل طاقة ضغطه الكامنة المتوفرة لطاقة حركية. يخرج كسيل ضيق من الماء السريع الحركة ويتقوّس برشاقة خلال الهواء. فلا عجب أنك تستطيع توصيل الماء للأجزاء البعيدة من حديقتك عندما تستخدم فوهة.

معتقدات خاطئة شائعة: السرعة والضغط في الموائع

المعتقد الخاطئ:

المائع المتحرك بسرعة عالية يكون له دائماً ضغط منخفض.

القرار:

يعتمد ضغط جزء معين من المائع على حالته ويمكنه أن يأخذ أي قيمة، مرتفعة أو منخفضة. ولكن إذا تسارع المائع، دون أي هبوط أثناء تدفقه، على طول خط انسياب وهو في حالة تدفق مستقر، فإن ضغطه سينخفض. في هذا السياق الخاص، المائع الأعلى سرعة له ضغط أقل.

تحقق من فهمك #٤: تنظيف المنزل (للإجابة، انظر صفحة ١٩٤)

حينما يتدفق الهواء بثبات لفتحة المكنسة الكهربائية الضيقة، فإنه يتسارع ليصل سرعات عالية وينخفض ضغطه لأقل من الضغط الجوي. من أين تأتي الطاقة الحركية المستجدة للهواء؟

بداية الاضطراب

حينما توجه سيل الماء باتجاه النباتات في حديقتك، تلاحظ ظاهرتين مثيرتين: أولا: دفع السيل لأي سطح يبطئه، وثانيا: ميل سيل الماء للتفرُّع عندما يتدفق حول العوائق. إن تأثير الدفع هو نتيجة أخرى لقانون برنولي: عندما يواجه سيل الماء سطحاً، فإنه يتباطأ وينتشر جانبيا. حينما يتباطأ الماء بالقرب من السطح، فإن ضغطه هناك يرتفع أعلى من الضغط الجوي وإن هذا الارتفاع في الضغط هو في الحقيقة الذي يدفع السطح إلى الأمام.





شكل ٤،١،٦: في الصورة اليسرى، يتدفق الماء ببطء مروراً بصخور في الجدول، ولزوجته تُبقيه سلساً وطبقياً. في الصورة اليمنى، يتدفق الماء بسرعة مروراً بصخور في الجدول، وقصوره الذاتي يفصله إلى تجاويف مدوِّمة ورشاشة من الاضطراب.

لكن تأثير التفرع شيء جديد. أثناء محاولة التحرك حول العائق، يفقد سيل الماء تركيبه المنتظم ويتفكك إلى رغوة مهسهسة ومُدوِّمة. في الواقع، الهسهسة التي تسمعها مألوفة؛ لقد سمعتها عندما فتحت الصنبور لكي يبدأ الماء بالتدفق خلال الخرطوم. يستخدم ذلك الصنبور سدادة متحركة للتحكم بتدفق الماء في الخرطوم؛ فأثناء فتحك الصنبور، قمت بإزالة هذه السدادة تدريجياً من أنبوب الماء للسماح للماء بالتدفق بحرية أكثر إلى الخرطوم وأصدر الصنبور صوت هسهسة. سواء صادف الماء نباتاً أو سدادة صنبور، فهناك شيء ما عن السرعات العالية والعوائق يتسبب في اضطراب تدفق المائع السلس.

حتى الآن، ناقشنا فقط التدفق الطبقي – تدفق سلس وصامت يوصف بخطوط انسياب بسيطة. في التدفق الطبقي، المناطق المتجاورة من المائع تظل دائما متجاورة. على سبيل المثال، إذا وضعت قطرتين من الصبغة بالقرب من بعضهما في جدول يتدفق بسلاسة، فإنهما سيظلان بالقرب من بعضهما إلى أمد غير محدد أثناء إتباعهما خطوط انسياب في التدفق الطبقي (شكل ٤،١،٦). إن التدفق الطبقي هو النتيجة المنظمة لقوى اللزوجة، والتي تميل إلى جعل الأجزاء المتجاورة من المائع تسير بنفس السرعة. عندما تسود اللزوجة على حركة مائع، فإن التدفق في الغالب طبقي.
لكن حينما يتدفق الجدول بسرعة كبيرة ماراً بصخور وعوائق، فإن خطوط انسيابه تنفصل لتيارات دائرية و»ماء أبيض» زبد والتي تجعل من ركوب الرمَث (raft طوافة) مثيرا. تتبدد الصبغة بسرعة في هذا الاضطراب الهائج. يواجه الجدول تدفقاً اضطرابياً – تدفق معكّر وصاخب بحيث تصبح مناطق المائع المتجاورة متباعدة عن بعضها أثناء تحركها بشكل مستقل في اتجاهات لا يمكن التنبؤ بها. إن التدفق الاضطرابي هو النتيجة غير المنظمة للقصور الذاتي، والذي يميل لدفع كل جزء من المائع بشكل مستقل بناء على كمية حركته. عندما يسود القصور الذاتي على حركة مائع، فإن التدفق في الغالب اضطرابي.
من الواضح أن النباتات وسدادة الصنبور تنشئ اضطراباً في ما كان سابقا تدفقا طبقيا؛ تدفقات كان يسودها قوى اللزوجة وفجأة أصبح يسودها بدلاً منها القصور الذاتي. إن كون التدفق طبقياً أو اضطرابياً يعتمد على عدد من خصائص المائع وبيئته:

١. لزوجة المائع. تميل قوى اللزوجة لإبقاء مناطق المائع المتجاورة تتحرك سوية، لذا فإن اللزوجة العالية تفضّل التدفق الطبقي (شكل ٥،١،٦).

٢. سرعة المائع المار بعائق ساكن. كلما زادت سرعة تحرك المائع، زادت سرعة انفصال منطقتين متجاورتين وكان من الصعب لقوى اللزوجة إبقاؤهما سوية.

٣. حجم العائق الذي يواجهه المائع. كلما كبر حجم العائق، زاد احتمال إحداثه اضطراب لأن قوى اللزوجة ستكون غير قادرة على إبقاء المائع منتظماً لمسافات طويلة.

٤. كثافة المائع. كلما زادت كثافة المائع، قلّ استجابته لقوى اللزوجة وزاد احتمال أن يصبح مضطربا.



بإذن من لوي بلومفيلد



شـكل ٥،١،٦: لزوجة العسل الكبيرة تبقيه متدفقاً بسلاسـة (تدفق طبقي) عندما تسكبه. لزوجة الماء الملوّن الصغيرة تسمح له بالارتشاش (تدفق اضطرابي).

بدلا من متابعة جميع الكميات الفيزيائية الأربعة بشكل مستقل، فإن عالم الرياضيات والمهندس البريطاني أوزبرن رينولدز (١٨٤٢ - ١٩١٢م) وجد أنه يمكن دمجها في عدد واحد والذي يسمح بمقارنة ما تبدو أنها تدفقات مختلفة. يعرّف عدد رينولدز كالتالي:

عدد رينولدز = (سرعة التدفق × طول عائق X الكثافة) / اللزوجة (٢،١،٦)

الوحدات على يمين المعادلة (٢،١،٦) تلغي بعضها البعض بحيث يكون عدد رينولدز بلا أبعاد، أي أنه فقط عدد بسيط، مثل 10 أو 25,000. حينما يزيد عدد رينولدز، فإن التدفق يتغير من لزوجة سائدة إلى قصور ذاتي سائد وبالتالي من تدفق طبقي إلى اضطرابي. وجد رينولدز في تجاربه أن الاضطراب يظهر في العادة عندما يتجاوز عدد رينولدز 2300 تقريبا. يمكنك مشاهدة هذا التحوّل بتحريك عصا سمكها 1cm (0.4in) خلال ماء ساكن. إذا حركت العصا ببطء، حوالي 10cm/s (4inch/s)، سيكون عدد رينولدز حوالي 1000 والتدفق حول العصا سيكون طبقيا. لكن إذا زدت سرعة العصا لحوالي 50cm/s (20inch/s)، سيرتفع عدد رينولدز لحوالي 5000 وسيصبح التدفق اضطرابيا.

إن أحد أكثر مميزات التدفقات الاضطرابية شيوعاً هو الدوامة، وهي منطقة ملتفة في المائع تتحرك بشكل دائري حول تجويف مركزي. تشبه الدوامة إعصاراً صغيراً يتكوّن تجويفه نتيجة القصور الذاتي عند دوران المائع. يسهل مشاهدة الدوامات خلف مجداف الزورق أو في وعاء الخلط. بمجرد أن يتحرك جسم بسرعة كافية خلال مائع لإحداث اضطراب، فإن هذه الدوامات تبدأ بالتشكّل. تتكون كل دوامة خلف الجسم لكن سريعاً ما تتحرك لتكوّن أثراً لدوامات منفصلة (شكل ٦،١،٦).



شـكل ٦،١،٦: عندما يتدفق الماء بسرعة حول أسطوانة، فإن تدفقه يصبح اضطرابيا. يتشكّل نمط من الدوامات الدائرية على يمين هذه الأسطوانة.

مع أن التدفق الطبقي قابل لأن يُتنبأ به تماماً، إلا أن التدفق الاضطرابي يُظهر سلوكاً فوضوياً أو فوضى: لا تعود تستطيع التنبؤ بالضبط أين ستذهب أي قطرة معينة من الماء. إن علم الفوضى هو حقل جديد نسبياً من

حقول العلم. بما أن النظام الفوضوي – وهو نظام يُظهر فوضى – حساس بشكل كبير للشروط الابتدائية، فإن التغير الطفيف في تلك الشروط قد يُحدث تغيرات عظيمة في حالته لاحقا.

حتى حين لا يمكنك مشاهدة تدفق الماء الاضطرابي، فإنك في العادة يمكنك أن تسمعه. إن الحركة الرغوية للاضطراب تحوّل بعضاً من الطاقة الكلية للماء إلى طاقة حرارية وصوت. يقلل الاضطراب القريب من الصنبور بشكل طفيف من الطاقة الكلية للماء عند دخوله للخرطوم وبالتالي من سرعته عند خروجه من الفوهة وارتشاشه باتجاه حديقتك.

يحدث صوت آخر عندما تُغلق الفوهة فجأة ويتوقف تدفق الماء. للماء المتحرك كمية حركة، ويتطلب وقفه بشكل مفاجئ قوة عكسية هائلة. بما أن التدفق البطيء ليس في حالة استقرار، فإن معادلة برنولي لا تنطبق ويمكن للضغط أن يشتد بالقرب من مقدمة الماء المتحرك ويصل لمقادير ضخمة لا تصدق. هذا الاشتداد في الضغط هو ما يجعل الماء يتسارع عكسياً لتبطئته وهو أيضاً ما يؤدي لصوت القرع المرتفع والذي تسمعه عند توقف الماء. يعرف الضغط الشديد بمطرقة الماء، وكونه في مقدمة الماء المتوقف يجعل الفوهة ترتج، والخرطوم ينتفخ، وحتى قد يقعقع الأنابيب في منزلك.

تحقق من فهمك #٥: عواصف الرياح المدنية

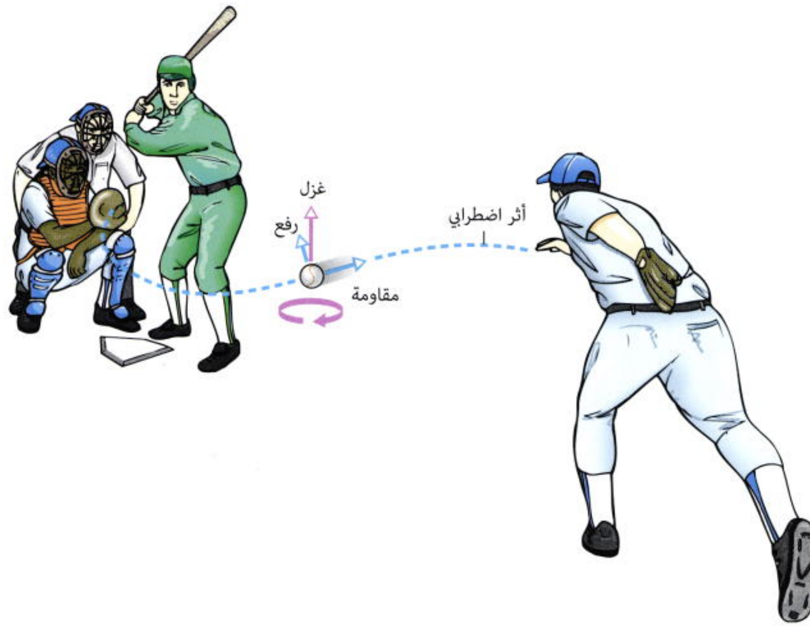
(للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

في يوم عاصف في مدينة فيها العديد من المباني المرتفعة، يمكن رؤية أوراق الشجر وقطع الورق تحلق بشكل دوامي في الهواء أو على الأرصفة. ما الذي يسبب هذه التيارات الهوائية الدائرية؟

دقق في أرقامك #٢: الريح في الطريق المفتوح

(للإجابة، انظر صفحة ١٩٤)

هل تدفق الهواء حول سيارة ذات غطاء قابل للطي طبقي أم اضطرابي عندما تجوب السيارة الطريق السريع؟ (لزوجة الهواء معطاة في جدول ١،١،٦)



٦-٢ الكرات والهواء

إن معظم الدقة والفروق الطفيفة في الألعاب مثل البيسبول والغولف تأتي من طريقة تفاعل الكرات مع الهواء. إذا لُعبت البيسبول على القمر، والذي لا يوجد فيه هواء، فسيُعد هبوط الكرة السريعة القذف هو القذف المثير الوحيد. ولاعبو الغولف على القمر لن يقلقوا حول الخطافات أو الشرائح. في هذا القسم سوف نتحرّى عن كيفية تأثير الهواء على تحليق الكرات وأجسام أخرى متعلقة.

أسئلة للتفكير

لماذا يمكنك قذف كرة بيسبول حقيقية لمسافات أبعد من قذف كرة بلاستيكية مجوفة؟ لماذا تبدو الكرة المقذوفة لمسافات بعيدة بأنها تسقط رأسياً للأسفل عندما تحاول أن تمسك بها في مركز ساحة لعبة البيسبول؟ أي نوع من القوة يجعل من الكرة الملتفة تلتف؟ ما الذي يجعل كرة الغولف المقذوفة جيداً تحلق في الهواء قبل أن تسقط على العشب؟ كيف يمكن لكرة-المفاصل (كرة مقذوفة بثني إصبع السبابة أو الوسطى) أو كرة-البصاق (كرة مقذوفة بعد تبللها بالبصاق أو أي مادة أخرى لإحداث تغيير في حركتها) أن تتحرك بشكل هائج أثناء تحليقها؟

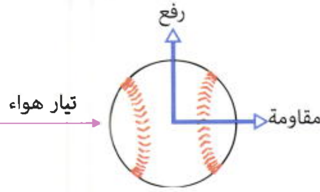
تجارب يمكن القيام بها

لجعل تأثير الهواء أكثر ظهورا، ستحتاج لكرة وزنها قليل ولكن لها مساحة سطح كبيرة. كرة البحر المنفوخة مثالية في هذه الحالة، ولكن استخدام كرة بلاستيكية مجوفة أو كرة الويفل *(whiffle)* أيضاً مناسب. راقب إلى أي بعد يمكنك أن تقذف الكرة. كيف تتوقف الكرة؟ هل تتباطأ وتفقد ارتفاعها تدريجيا، أم أنها تتوقف بشكل مفاجئ وتسقط للأرض؟ الآن اجعل الكرة تلف عندما ترميها. لماذا تنحرف الكرة أثناء تحليقها؟ هل لف الكرة مغزلياً بسرعة يجعلها تنحرف بشكل أكبر أم أقل؟ في أي اتجاه تلتف الكرة، وكيف يرتبط اللف باتجاه انحرافها؟ غيّر اتجاه اللف. في أي اتجاه تنحرف الكرة الآن؟

عندما تتحرك الكرة ببطء: تدفق الهواء الطبقي

أول الأشياء التي قد تلاحظها إذا انضممت لوكالة بيسبول جديدة على سطح القمر هو أن الكرات المقذوفة تصل للقاعدة الرئيسية أسرع منها على الأرض. بما أن القمر ليس له غلاف جوي، فإنه لا يوجد أي مقاومة للهواء لتبطئة الكرة. في القسم السابق، رأينا كيف أن الأجسام تؤثر على الموائع المتحركة. والآن وأثناء دراستنا الديناميكا الهوائية، وهي علم تفاعلات الهواء الحركية، سنرى كيف تؤثر الموائع على الأجسام المتحركة.

تواجه الكرة المتحركة في الهواء قوى ديناميكا هوائية، أي قوى مبذولة عليها من قبل الهواء بسبب حركتهما النسبية. تتضمن قوى المقاومة الهوائية التي تدفع الكرة باتجاه الرياح وقوى الرفع التي تدفع الكرة لجانب أو لآخر (شكل ١,٢,٦). سوف نبدأ دراستنا لديناميكا الكرة الهوائية بدراسة قوى المقاومة الهوائية، وتعرف في العادة «بمقاومة الهواء»، وسننظر أولاً لكرة بطيئة الحركة. السبب في البدء بالحركة البطيئة هو أنه عند السرعات المنخفضة، تستطيع قوى اللزوجة أن تنظّم الهواء أثناء تدفقه حول الكرة؛ تسود اللزوجة على القصور الذاتي ويكون تدفق الهواء حول الكرة البطيئة الحركة تدفقاً طبقياً.



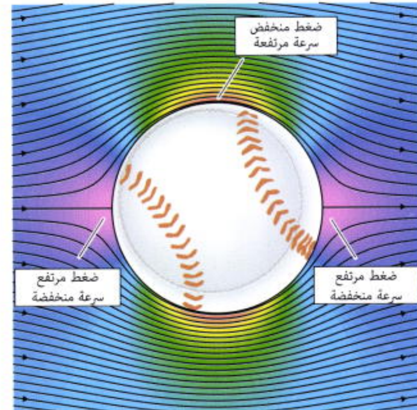
شكل ١,٢,٦: نوعا قوى الديناميكا الهوائية المبذولة على الأجسام من قبل الهواء هي المقاومة الهوائية والرفع. تبذل المقاومة الهوائية بشكل موازٍ مع خطوط انسياب الهواء المتدفقة وتبطئ من حركة الجسم خلال الهواء. يبذل الرفع بشكل عمودي على خطوط انسياب الهواء بحيث يدفع الجسم لجانب أو لآخر. الرفع ليس بالضرورة في الاتجاه الأعلى.

يوضح شكل (٢,٢,٦) نمط تدفق الهواء الطبقي حول الكرة البطيئة الحركة. في الواقع، النمط هو نفسه سواء تحركت الكرة ببطء خلال الهواء أو تحرك الهواء ببطء ماراً بالكرة. للتبسيط، دعنا نتحرك بمحاذاة الكرة وندرس تدفق الهواء من إطار مرجع الكرة القصوري. في ذلك الإطار القصوري، تبدو الكرة ساكنة والهواء يتدفق ماراً بها.

ينفصل الهواء البطيء الحركة بشكل مرتب حول مقدمة الكرة ويتجمّع خلفها. يترك الهواء أثراً، أي ذيل من الهواء خلف الكرة، سلساً وخالياً من أي اضطراب. ولكن سرعة الهواء وضغطه ليسا منتظمين في جميع النواحي حول الكرة. ينحني تدفق الهواء عدة مرات أثناء سيره حول الكرة، وكما رأينا في القسم السابق، مثل هذه الانحناءات تتضمن دائماً ضغوطاً غير متوازنة. بما أن ضغط الهواء بعيداً عن الكرة ثابت عند الضغط الجوي، فإن تلك الضغوط غير المتوازنة سببها دائماً تغيرات في الضغط بالقرب من سطح الكرة. كلما ينحني الهواء بعيداً عن الكرة، بحيث تكون الكرة في الجزء الخارجي للانحناء، فإن الضغط بالقرب من الكرة يجب أن يكون أعلى من الضغط الجوي. وكلما ينحني الهواء باتجاه الكرة، بحيث تكون الكرة في الجزء الداخلي للانحناء، فإن الضغط بالقرب من الكرة يجب أن يكون أقل من الضغط الجوي.

بتلك المقدمة، دعنا نفحص تدفق الهواء البطيء الحركة حول الكرة. إن الهواء المتجه باتجاه واجهة الكرة ينحني بعيداً عنها، لذا فإن الضغط بالقرب من واجهة الكرة لا بد أن يكون أعلى من الضغط الجوي. هذا الارتفاع في ضغط الهواء يصاحبه نقص في سرعة الهواء – أي سرعة الهواء بالنسبة للكرة. يشير شكل (٢,٢,٦) لارتفاع الضغط بتغير اللون باتجاه الطرف البنفسجي للطيف ويشير لنقص سرعة الهواء باتساع المسافات بين خطوط الانسياب.

الهواء المحيط بجوانب الكرة ينحني باتجاهها، لذا فإن الضغط القريب من جوانب الكرة لا بد أن يكون أقل من الضغط الجوي. يصاحب هذا الانخفاض في ضغط الهواء ارتفاع في سرعة الهواء. يشير شكل (٢,٢,٦) لانخفاض الضغط بتغير اللون باتجاه الطرف الأحمر للطيف ويشير للزيادة في سرعة الهواء بضيق المسافات بين خطوط الانسياب.



شكل ٢,٢,٦: تدفق الهواء حول كرة بطيئة الحركة هو تدفق طبقي. يتباطأ الهواء أمام وخلف الكرة (اتساع بين خطوط الانسياب)، ويزداد ضغطه (تغير اللون باتجاه الطرف البنفسجي من الطيف). تزداد سرعة الهواء على جوانب الكرة (ضيق المسافات بين خطوط الانسياب)، وينخفض ضغطه (تغير اللون باتجاه الطرف الأحمر من الطيف). ولكن قوى الضغط على الكرة توازن بعضها البعض تماما، فلا تواجه أي مقاومة من الضغط. فقط تتواجد مقاومة اللزوجة وهي التي تؤثر على الكرة.

يستمر تدفق الهواء الطبقي حول الكرة إلى أن يصل لمؤخرتها ثم يستمر خلفها. بما أن الهواء خلف الكرة ينحني مرة أخرى بعيداً عن الكرة، فإن الضغط بالقرب من مؤخرة الكرة لا بد أن يكون أعلى من الضغط الجوي. يشير شكل (٢،٢،٦) لارتفاع الضغط بحيود اللون باتجاه البنفسجي ويشير للانخفاض في سرعة الهواء الذي يصاحبه بتباعد خطوط الانسياب.

قد يبدو غريباً أن ضغط الهواء يمكن أن يكون مختلفاً عند نقاط مختلفة على الكرة، ولكن هذا ما يحدث في تيار هواء متدفق. وما هو مدهش على وجه الخصوص هو أن الهواء ذا الضغط المنخفض على جانبي الكرة يستطيع أن يتدفق حول الكرة إلى مؤخرتها، حيث الضغط هناك أكثر ارتفاعا. يواجه هذا الهواء عدم توازن في الضغط والذي يدفعه للخلف، عكس اتجاه حركته. لكن عدم توازن الضغط يتسبب في حدوث تسارع، وليس سرعة، والهواء ذو الضغط المنخفض المتدفق ماراً بجوانب الكرة له طاقة وكمية حركة للأمام كافية لحمله على طول المسار لمؤخرة الكرة. على الرغم من أن هذا الهواء يتباطأ أثناء تدفقه لمنطقة الضغط المتزايد، لكنه يتمكن من إنهاء رحلته.

إن تدفق الهواء حول الكرة متناظر، والقوى التي يبذلها ضغط الهواء على الكرة متناظرة أيضا. تلغي قوى الضغط هذه بعضها البعض تماماً بحيث لا تواجه الكرة أي قوة إجمالية بسبب الضغط. والأكثر أهمية، أن الضغط المرتفع أمام الكرة يوازنه الضغط المرتفع خلفها. نتيجة لهذا الترتيب المتناظر، فإن قوة الديناميكا الهوائية الوحيدة التي تؤثر على الكرة هي مقاومة اللزوجة - أي قوة الاحتكاك في اتجاه التدفق التي سببها تزحلق طبقات من الهواء اللزج على سطح الكرة (انظر ◊[٤]).

مع أننا سنرى قريباً أن مقاومة اللزوجة هي فقط جزء بسيط من مقاومة الهواء التي يواجهها كرات الألعاب الرياضية، إلا أنها هي القوة التي تعلّق الغبار في الهواء لعدة ساعات وهي قضية مهمة لأجنحة الطائرات. وهي أيضا قوة تعرضنا لها من قبل: أبطأت مقاومة اللزوجة الماء في خرطوم الماء الذي في حديقتك في القسم السابق!

◊[٤]عندما يكون تدفق الهواء الجسم طبقيا، فإن قوى الضغط عليه تُلغى تماماً ولا يواجه أي مقاومة بسبب عدم توازن الضغوط - أي لا يواجه مقاومة ضغط. كان فقدان مقاومة الضغط لغزاً كبيراً لأخصائيّ الديناميكا الهوائية، والذين كانوا يعرفون أن تدفق الهواء حول الغبار طبقي وأنه يواجه قوة مقاومة هوائية. سُمي هذا اللغز بتناقض دا-ليمبرت، نسبة لجين لي رود دا-ليمبرت (١٧١٧ - ١٧٨٣م)، الرياضي الفرنسي الذي لاحظ هذه الظاهرة أولا. لم يكن يعرف دا-لمبرت ومعاصروه عن قوة مقاومة اللزوجة، والتي هي في الحقيقة ما تبطئ حركة الغبار خلال الهواء.

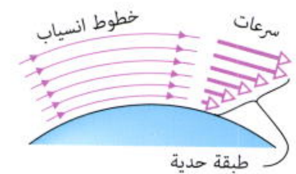
تحقق من فهمك #١: التدفق السلس في الجدول (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

عندما يتدفق الماء في جدول ببطء ماراً بصخرة صغيرة، فإن الماء الذي أمام الصخرة يتباطأ، وترفع زيادة ضغطه مستوى الماء قليلا. ويرتفع مستوى الماء خلف الصخرة قليلاً أيضاً. فسّر ذلك.

عندما تتحرك كرة بسرعة: تدفق الهواء الاضطرابي

لا تواجه الكرات تدفقاً طبقياً دائما. التدفق الاضطرابي شائع، وخصوصاً في الألعاب الرياضية، ويجلب معه نوعاً جديداً من قوة المقاومة. عندما يكون تدفق الهواء حول الكرة اضطرابيا، فإن توزيع ضغط الهواء لا يعود متناظراً فتواجه الكرة مقاومة الضغط - أي القوة باتجاه التيار المبذولة من قبل الضغوط غير المتوازنة في الهواء المتحرك. تبذل هذه الضغوط غير المتوازنة قوة إجمالية على الكرة والتي تبطئ من حركتها خلال الهواء.

يمكن أن تواجه الكرة تدفق هواء اضطرابياً ومقاومة ضغط عندما يتجاوز عدد رينولدز حوالي 2000. يدمج عدد رينولدز، والذي سبق تعريفه في القسم السابق، بين حجم الكرة وسرعتها مع كثافة الهواء ولزوجته ليعطي مؤشراً ما إذا كان تدفق الهواء يحكمه اللزوجة أم القصور الذاتي. عند القيم المنخفضة لعدد رينولدز، لزوجة الهواء تسود على قصوره الذاتي ويكون تدفق الهواء طبقيا. لكن عند القيم المرتفعة لعدد رينولدز، فإن القصور الذاتي للهواء يسود على لزوجته ويميل تدفق الهواء لأن يكون اضطرابيا. ولكن هذا الاضطراب لن



شكل ٣،٢،٦: حينما يتدفق الهواء ماراً بسطح، فإن طبقة رقيقة منه تتباطأ بفعل قوى مقاومة اللزوجة. هذه الطبقة الحدّية هي طبقية عند القيم المنخفضة لعدد رينولدز ولا تصبح اضطرابية إلا إذا تجاوز عدد رينولدز حوالي 10,000.

يبدأ إلا إذا أثاره شيء ما واللزوجة هي التي توفر هذه الإثارة.
لفهم دور اللزوجة، يجب أن ننظر إلى الهواء القريب من سطح الكرة. حتى في حالة الرياح القوية، فإن قوى اللزوجة تبطئ من سرعة الطبقة الحدّية الرقيقة من الهواء القريب من سطح الكرة (شكل ٣،٢،٦). هذه الطبقة الحدّية، والتي اكتشفها ليدويغ براندتل بمساعدة غوستاف أيفل (شكل ٤،٢،٦)، تتحرك بسرعة أبطأ ولها طاقة كلية أقل من سرعة وطاقة الهواء الأبعد عن السطح المتدفق بحرية.

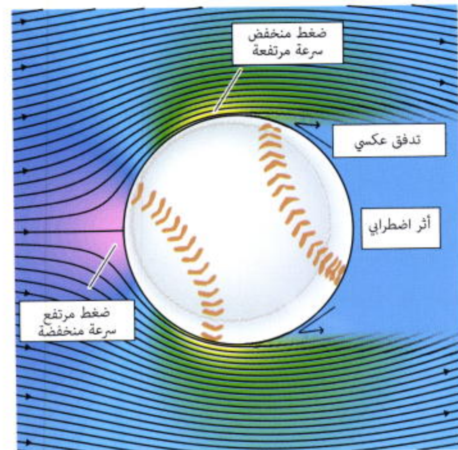
حينما يتدفق الهواء باتجاه مؤخرة الكرة، فإنه يسير خلال تدرج ضغط مضادي – أي منطقة يتزايد فيها الضغط والذي يدفع عكسياً على الهواء ويتسبب في تباطئه. مع أن تيار الهواء المتدفق بحرية خارج الطبقة الحدّية له طاقة وكمية حركة للأمام كافية ليتمكن من الاستمرار في التقدم للأمام حتى يصل لمؤخرة الكرة وحده، إلا أن الهواء في الطبقة الحدّية ليس لديه ذلك ويحتاج دفعة للأمام.
عند أعداد رينولدز المنخفضة، يساعد تيار الهواء بأكمله في دفع تلك الطبقة الحدّية إلى مؤخرة الكرة ويظل تدفق الهواء طبقيا. لكن عند أعداد رينولدز المرتفعة، فإن قوى اللزوجة بين تيار الهواء المتدفق بحرية والطبقة الحدّية ضعيفة ولا تستطيع إبقاء الطبقة الحدّية متحركة للأمام إلى منطقة الضغط المتزايد خلف الكرة.
بدون مساعدة كافية، تتعطل الطبقة الحدّية في النهاية – أي تتوقف عن الحركة وبالتالي تفسد تدفق حالة الاستقرار. والأكثر فظاعة، أن هذه الطبقة الحدّية المتعطلة تُدفع للخلف من قبل تدرج الضغط المضادي وتعود إلى جوانب الكرة. أثناء ذلك، تقطع كالوتد بين الكرة وتيار الهواء المتدفق بحرية. النتيجة هي كارثة ديناميكية هوائية: ينفصل تيار الهواء عن الكرة، تاركاً أثراً اضطرابياً هائلاً أو تجويفاً هوائياً خلف الكرة (شكل ٥،٢،٦).
بسبب هذا الأثر الاضطرابي، فإن الهواء لا يعود ينحني بسلاسة بعيداً عن مؤخرة الكرة ولا يوجد ارتفاع في الضغط هناك. بدلاً من ذلك، يكون الضغط خلف الكرة تقريباً عند الضغط الجوي. إن غياب وجود منطقة ضغط مرتفع خلف الكرة يُفسد التناظر في قوى الضغط المبذولة على الكرة وهذه القوى لا تعود تلغي بعضها. تواجه الكرة قوة ضغط إجمالية باتجاه التيار – وهي قوة مقاومة الضغط. في الواقع، تحوّل الكرة كمية حركة أمامية إلى الهواء في أثره المضطرب وتسحب هذا الأثر معها.

إن مقاومة الضغط تكاد تبطئ أي كرة محلّقة تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الحلزون. تتناسب مقاومة الضغط تقريباً مع مساحة مقطع تجويف الهواء المضطرب ومع مربع سرعة الكرة خلال الهواء. بالنسبة لكرة تتحرك بسرعة معتدلة، فإن التجويف الهوائي له نفس عرض الكرة تقريباً وتواجه الكرة قوة مقاومة ضغطية كبيرة.

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ٤،٢،٦: نُفّذت التجارب المبكرة في علم الديناميكا الهوائية من قبل جوستاف أيفل (مهندس فرنسي، ١٨٣٢ – ١٩٢٣م)، والذي قام بتصميم البرج الشهير الذي يحمل اسمه. في العقد ١٨٩٠، أسقط أيفل أجساماً مختلفة الأحجام والأشكال من برجه وقام بقياس المقاومة التي واجهتها. استخدم براندتل نتائجه لتفسير انخفاض المقاومة المصاحبة لظهور الطبقات الحدّية الاضطرابية.



شكل ٥،٢،٦: عندما تعطي سرعة الكرة للكرة عدد رينولدز بين 2000 و100,000 تقريباً، فإن طبقتها الحدّية الطبقية تتوقف في الضغط المتزايد خلف الكرة. يتسبب التدفق المعاكس الناتج في فصل تدفق الهواء الرئيسي عن سطح الكرة، تاركاً خلفه أثراً اضطرابياً كبيراً. يظل متوسط الضغط خلف الكرة منخفضاً، وتواجه الكرة مقاومة ضغط كبيرة.

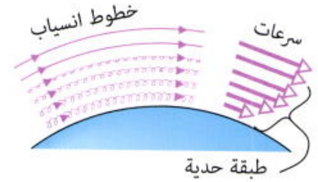
تحقق من فهمك #٢: عدم ترك أي أثر (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

عندما يسير زورقك (الكَنُو) بسرعة بطيئة جداً عبر الماء في بحيرة ساكنة، فإنه تقريباً لا يترك أي أثر في الماء خلفه. لكن عندما تجدّفه بسرعة عالية خلال الماء، فإن الزورق يترك أثراً دوامياً. فسر هذا الاختلاف.

النقرات على كرة الغولف

لو كانت هذه هي القصة بأكملها لما كنت ستستطيع أبداً أن تحرز هدفاً في لعبة البيسبول أو تضرب كرة الغولف لمسافة 250 ياردة على ساحة اللعب. لكن القصور الذاتي له دور آخر يلعبه.

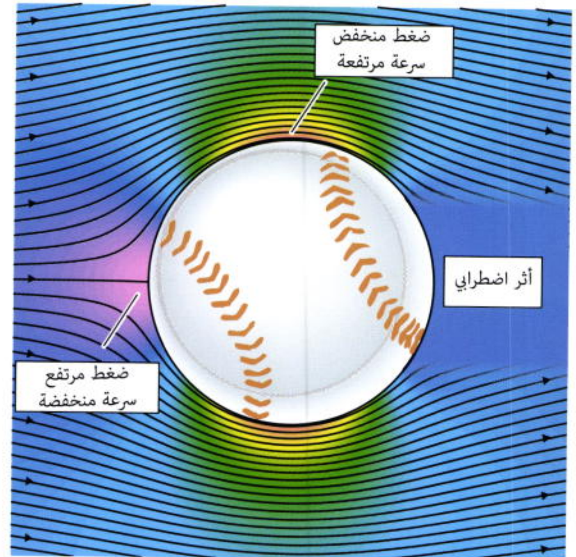
في أعداد رينولدز الكبيرة تصبح الطبقة الحدّية ذاتها مضطربة (شكل ٦,٢,٦). تفقد هذه الطبقة خطوط انسيابها الطبقية وتبدأ بالاختلاط بسرعة ببعضها وبتيار الهواء المجاور والمتدفق بحرية. يجلب هذا الخلط طاقة وكمية حركة أمامية إضافيتين للطبقة الحدّية فتجعل توقيفها أكثر صعوبة وأكثر مقاومة للتدفق المعاكس. على الرغم من أن هذه الطبقة الحدّية المضطربة مازالت تتعطل قبل أن تصل لمؤخرة الكرة، إلا أن الهواء المتعطل يتدفق ضد التيار لمسافة قصيرة فقط. ومع أن التيار الهوائي المتدفق بحرية مازال ينفصل عن الكرة، إلا أن ذلك الانفصال يحدث خلف الكرة على مسافة بعيدة ويكون الأثر الاضطرابي الناتج صغيراً نسبياً (شكل ٧,٢,٦).



شكل ٦,٢,٦: عندما يتجاوز عدد رينولدز 100,000 تقريباً، تصبح الطبقة الحدّية للهواء المتدفق مروراً بسطح مضطربة. يجلب هذا المائع الدوامي طاقة وكمية حركة إضافيتين من تيار الهواء المتدفق بحرية ويمكنه السير بعمق داخل منطقة تزايد الضغط.

نتيجة لهذا التجويف الهوائي الأصغر، فإن مقاومة الضغط تنخفض عما كانت ستكون عليه بدون الطبقة الحدّية المضطربة. إن أثر استبدال الطبقة الحدّية الطبقية بأخرى مضطربة هائل جدا؛ هو الفرق بين ضرب كرة الغولف لمسافة 70 ياردة وآخر لمسافة 250 ياردة! إن آثار عدد رينولدز على تدفق الهواء حول كرة ملخّصة في جدول ١,٢,٦.

إن تأخير انفصال تدفق الهواء خلف مؤخرة الكرة مهم جدا بالنسبة للمسافة والسرعة لدرجة أن الكرات الخاصة بألعاب رياضية متعددة تصمم لتحفيز طبقة حدّية مضطربة (شكل ٨,٢,٦). بدلاً من انتظار عدد رينولدز ليتجاوز 100,000، وهو النقطة التي تصبح قريباً منها الطبقة الحدّية مضطربة تلقائيا، فإن هذه الكرات تجعل الطبقة الحدّية «تتعرقل» عمداً (شكل ٩,٢,٦). تقدم هذه الكرات بعض العوائق للتدفق الطبقي، مثل شعر أو عدم استواء في السطح، والتي تسبب في تقلّب الهواء القريب من سطح الكرة فيصبح مضطربا. إن الانخفاض في المقاومة الضغطية يعوض عن الزيادة الطفيفة في مقاومة اللزوجة وأكثر. ولهذا يكون لكرة التنس زغب ولكرة الغولف نقرات.



شكل ٧,٢,٦: عندما تسير كرة بسرعة كافية بحيث أن عدد رينولدز الخاص بها يتجاوز 100,000، فإن طبقتها الحدّية تصبح مضطربة. تسير هذه الطبقة المضطربة معظم الطريق حول مؤخرة الكرة قبل أن تنفصل عن السطح. يتبعها الهواء المتدفق بحرية، ويترك كلاهما أثراً اضطرابياً صغيراً نسبياً خلفهما. تواجه الكرة مقاومة ضغطية متواضعة فقط.

جدول ١,٢,٦: تأثير عدد رينولدز على تدفق الهواء حول كرة أو جسم آخر.

عدد رينولدز	الطبقة الحدّية	نوع الأثر	قوة المقاومة الرئيسية
< 2000	طبقية	طبقي صغير	لزوجة
2000 – 100,000	طبقية	اضطرابي كبير	ضغط
> 100,000	اضطرابية	اضطرابي صغير	ضغط

فإذاً ما مقدار تأثير المقاومة على الكرات في الألعاب الرياضية المختلفة؟ بالنسبة لتلك الألعاب التي تتضمن حركات سريعة خلال الهواء أو الماء، فإن الإجابة هي كثير. تتزايد قوى المقاومة بشكل هائل مع زيادة السرعة؛ بمجرد ظهور أثر اضطرابي ومقاومة ضغطية، فإن قوة المقاومة تزيد بالتناسب مع مربع سرعة الكرة. نتيجة لذلك، تتباطأ كرات البيسبول بشكل كبير أثناء تحليقها وصولاً للقاعدة الرئيسية، وكلما قُذفت بسرعة أكبر، زاد الفقد في سرعتها. الكرة السريعة التي تسير بسرعة 90mph تفقد حوالي 8mph في رحلتها، بينما الكرة الملتفة التي تسير بسرعة 70mph تفقد فقط حوالي 6mph.

تحلق الكرة المضروبة بالمضرب بشكل أفضل لأنها تسير بسرعة كافية لجعل الطبقة الحدّية حولها مضطربة، وهو تأثير يظهر عند السرعات القريبة من 160km/s (100mph). ومع أن الانخفاض الناتج في المقاومة يفسر لماذا يكون من الممكن ضرب كرة تحرز هدفاً، إلا أن وجود مقاومة الهواء لا يزال يقلل المسافة التي تقطعها الكرة بما يصل لـ 50 ٪. بدون مقاومة الهواء، ستحقق الكرة الاعتيادية المحلّقة هدفاً بمقدرتها على الخروج من ساحة الملعب. للتعويض عن مقاومة الهواء، فإن الزاوية التي يجب أن تُضرب بها الكرة لتصل لأقصى مسافة ليست هي الزاوية النظرية 45° فوق المستوى الأفقي والتي نوقشت في القسم ١-٢. بسبب ميل الكرة لفقد سرعتها الأفقية، فإنه يجب أن تُضرب بزاوية أقل، حوالي 35° فوق المستوى الأفقي (شكل ١٠,٢,٦).

بما أن الكرة تفقد معظم مركبة سرعتها الأفقية أثناء رحلتها باتجاه الساحة الخارجية للملعب، فإن الكرة المحلقة والتي قطعت مسافة طويلة تميل للهبوط بشكل رأسي تقريباً عندما تقوم بالإمساك بها. تتسبب الجاذبية في تحريكها للأسفل، لكن المقاومة تكاد توقف حركتها الأفقية بعيداً عن القاعدة الرئيسية. كما تحدّ المقاومة من سرعة الكرة الساقطة للأسفل لحوالي 160km/h (100mph). هذه هي السرعة النهائية لكرة البيسبول، أي السرعة للأسفل والتي يتوازن عندها تماماً قوة المقاومة الهوائية للأعلى مع وزن الكرة للأسفل فتتوقف عن التسارع. حتى لو أسقطت كرة بيسبول من طائرة، فإن سرعتها لن تتعدى هذه القيمة.

تحقق من فهمك #٣: تصميم سيارة سباق عظيمة

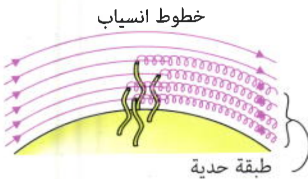
(للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

كمصمم للسيارات، مهمتك أن تقلل المقاومة الهوائية التي تواجهها السيارة التي تقوم بالعمل عليها. في أي مكان يجب أن تحاول تحديد النقطة التي ينفصل عندها تدفق الهواء عن السيارة؟

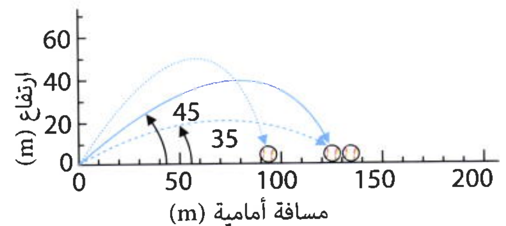


بإذن من مؤسسة ريبس

شكل ٨,٢,٦: كرات الغولف البدائية (يسار) كانت تصنع يدوياً من الجلد وتُحشى بالريش. أصبحت لعبة الغولف أكثر شعبية عندما بدأت تتوفر كرات رخيصة الثمن مصنوعة من المطاط الصلب وتسمى جوتا – بيرتشا (gutta-percha). لكن الكرات الجديدة والملساء من هذا النوع لم تتمكن من السير لمسافات بعيدة؛ بل كان أداؤها أفضل عندما تشققت وأصبحت بالية. بعد فترة قصيرة بدأ المصنعون في إنتاج كرات محفور عليها أنماط مختلفة من الأخاديد (أسفل ويمين)، وقطعت تلك الكرات مسافات أكبر بكثير من الكرات الملساء. كرات الغولف الحديثة (أعلى) لها نقرات بدلاً من الأخاديد.



شكل ٩,٢,٦: يمكن أن تصبح الطبقة الحدّية مضطربة عند عدد رينولدز أقل من 100,000 عن طريق «عرقلتها» بعوائق من الزغب أو النقرات.



شكل ١٠,٢,٦: تبطئ مقاومة الهواء من طيران كرة مضروبة بحيث تكون الزاوية المثالية لضربها ليست الزاوية النظرية 45° الموضحة في الشكل (٧,٢,١). سيحقق الضرب بزاوية 35° تقريباً فوق المستوى الأفقي أقصى مسافة ممكنة.

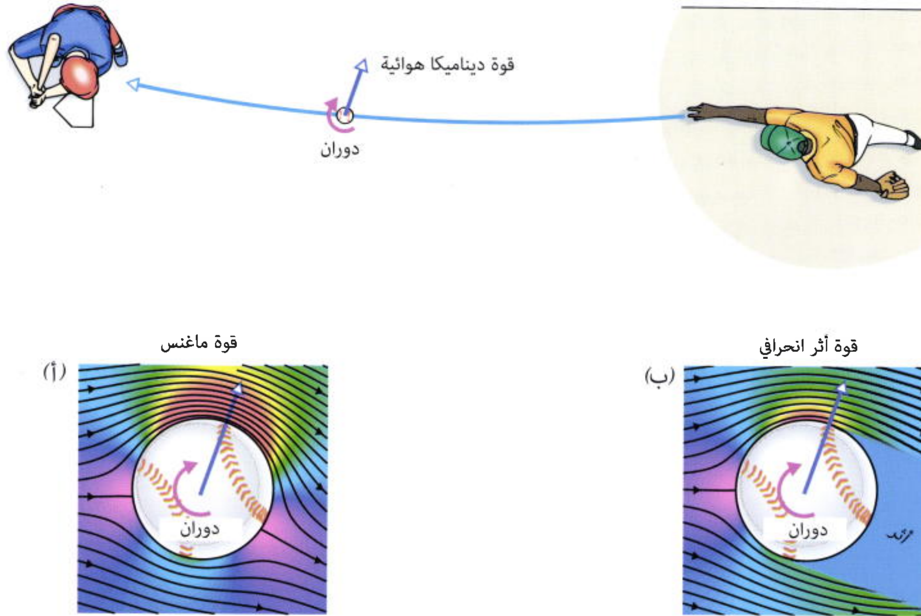
الكرات الملتفة وكرات المفاصل

إن قوى المقاومة على الكرة تدفعها باتجاه التيار، بموازاة اندفاع الهواء. لكن في بعض الحالات، قد تواجه الكرة قوى رفع أيضاً- أي قوى تبذل عمودياً على تدفق الهواء (شكل ١,٢,٦). لمواجهة المقاومة، ما على الكرة سوى أن تقلل من سرعة تدفق الهواء؛ ولمواجهة الرفع، فإنه يجب على الكرة أن تحرف تدفق الهواء لجانب أو لآخر. على الرغم من أن اسم هذه القوة يدل ضمنياً على أن القوة تتجه للأعلى، إلا أن قوة الرفع يمكنها أيضاً أن تدفع الكرة جانباً أو حتى للأسفل.

تستخدم كلا الكرات الملتفة وكرات المفاصل قوى الرفع. في كل من هذه القذفات الشهيرة للبيسبول، تحرف الكرة تيار الهواء لجانب وتتسارع الكرة باتجاه الجانب الآخر. مرة أخرى لدينا فعل ورد فعل - يدفع كل من الهواء والكرة بعضهما البعض. إن جعل الهواء يدفع الكرة جانباً ليس خدعة بسيطة. وتفسير هذه الخدعة ليس سهلاً أيضا، لكننا سنحاول.

تقذف الكرة الملتفة بجعل الكرة تدور مغزلياً بسرعة حول محور دوران عمودي على اتجاه حركتها. اختيار هذا المحور سيحدد اتجاه انعطاف الكرة. في شكل (١١,٢,٦)، تدور الكرة باتجاه عقارب الساعة، عند النظر إليها من الأعلى. بهذا الاختيار لمحور الدوران، ستنحرف الكرة إلى يمين الرامي لأن الكرة تواجه قوتي رفع لليمين. إحداهما هي قوة ماغنس (Magnus)، نسبة للفيزيائي الألماني هـ ج. ماغنس (١٨٠٢-١٨٧٠) والذي اكتشفها. والأخرى قوة سنسميها قوة الأثر الانحرافي.

تحدث قوة ماغنس بسبب أن الكرة الملتفة تحمل معها بعضاً من الهواء اللزج المحيط بها (شكل ١,٢,٦ أ). إن نمط تدفق حالة الاستقرار المتشكل حول هذه الكرة غير متناظر: فتيار الهواء الذي يتحرك مع السطح المتحرك أطول بكثير من تيار الهواء الذي يتحرك عكس ذلك السطح. بما أن تيار الهواء الأطول ينحرف في الغالب باتجاه كرة البيسبول، فإن متوسط الضغط على ذلك الجانب من الكرة يجب أن يكون أقل من الضغط الجوي. تيار الهواء الأقصر ينحرف في الغالب بعيداً عن الكرة، لذا فإن متوسط الضغط على ذلك الجانب من الكرة يجب أن يكون فوق الضغط الجوي. بسبب عدم موازنة قوى الضغط على جانبي الكرة بعضها البعض، فإن الكرة تواجه قوة ماغنس باتجاه الجانب ذي الضغط المنخفض - أي الجانب الذي ينعطف باتجاه الرامي - وتنحرف في ذلك الاتجاه. ينحرف تدفق الهواء بالاتجاه المعاكس.



شكل ١١,٢,٦: تواجه كرة البيسبول الملتفة بسرعة قوتي رفع تتسبب في انحرافها أثناء تحليقها. (أ) تحدث قوة ماغنس لأن الهواء المتدفق حول الكرة في اتجاه دورانها ينعطف في الغالب باتجاهها، بينما الهواء المتدفق عكس اتجاه دورانها ينعطف في الغالب بعيداً عنها. (ب) تحدث قوة الأثر الانحرافي لأن الهواء المتدفق حول الكرة في اتجاه دورانها يظل مرتبطاً بالكرة لفترة أطول فينحرف أثر الكرة.

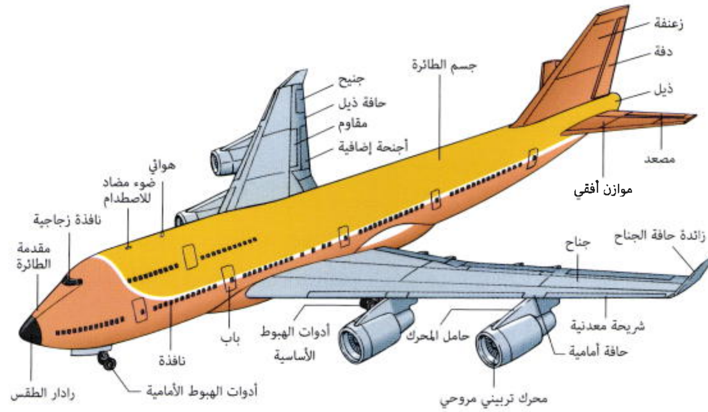
في التدفق الطبقي، تكون قوة ماغنس هي قوة الرفع الوحيدة المؤثرة على الجسم الملتف. لكن كرة البيسبول المقذوفة لها أثر اضطرابي خلفها ويؤثر عليها أيضاً قوة الأثر الانـحرافي. تظهر هذه القوة عندما يشوه دوران الكرة السريع من الأثر الواسع المتناظر (شكل ٥,٢,٦) والذي يتكون خلفها عند أعداد رينولدز الكبيرة. عندما لا تلتف الكرة، فإن تيار الهواء المتدفق بحرية ينفصل عن الكرة عند جوانبها تقريباً وهذا الانفصال متناظر على طول منتصف الكرة. لكن عندما تلتف الكرة (شكل ١١,٢,٦ ب)، فإن السطح المتحرك يدفع على تيار الهواء بواسطة قوى اللزوجة. نتيجة لذلك، يتأخر انفصال تيار الهواء في أحد جانبي الكرة ويعجَّل على الجانب الآخر. وبالتالي ينحرف الأثر الإجمالي من الهواء خلف الكرة لأحد الجانبين وتواجه الكرة قوة الأثر الانـحرافي في الاتجاه المعاكس - أي الجانب المنعطف باتجاه الرامي. يدفع كلٌّ من قوة الأثر الانـحرافي وقوة ماغنس الكرة في نفس الاتجاه.

من بين هاتين القوتين، من المحتمل أن تكون قوة الأثر الانـحرافي هي الأكبر أهمية بالنسبة للكرة الملتفة، على الرغم من أن قوة ماغنس غالباً ما تُعطى الفضل كله. يمكن للرامي المحترف أن يجعل كرة البيسبول تنعطف حوالي 0.3m (12in) أثناء تحليقها من قاعدة الرمي للقاعدة الرئيسية - كلما زاد الدوران زاد الانعطاف. يعتمد الرامي على هذا التغيير في الاتجاه لتشويش الضارب. يمكن أن يختار الرامي أيضا اتجاه الانعطاف باختيار محور دوران الكرة. ستنعطف الكرة دائما باتجاه جانب الكرة الذي يلتف باتجاه الرامي. عند قذف الكرة من قبل رامٍ أيمن اليد، ستنعطف الكرة الملتفة الصحيحة (حول محور دوران شبه رأسي وبعيدا عن الرامي) لليسار وللأسفل، وتنعطف الكرة المتزحلقة (حول محور دوران شبه أفقي وبعيدا عن الرامي) أفقيا ولليسار، وتنعطف الكرة اللولبية (حول محور دوران شبه رأسي وباتجاه الرامي) لليمين وللأسفل.

عندما يقذف الرامي كرة بدوران خلفي، بحيث تدور قمة الكرة باتجاه الرامي، فإن الكرة تواجه قوة رفع للأعلى. في لعبة البيسبول هذه القوة ليست قوية بشكل كافٍ للتغلب على الجاذبية، لكنها تجعل الكرة تحلق في الهواء لفترة أطول من المعتاد. وفي لعبة الغولف، حيث يستطيع المضرب أن يعطي الكرة دوراناً خلفياً كبيراً، فإن الكرة في الواقع ترفع نفسها للأعلى بحيث تحلق في مسارها مثل الطائرة الشراعية.
ولكن هناك بعض الحالات التي ينجم فيها سلوك الكرة من قلة دورانها. في كرة البيسبول، على سبيل المثال، تُقذف كرة المفاصل مع عدم إعطاء الكرة أي دوران تقريبا. عندها تصبح درزات الكرة مهمة جداً. حينما يمر الهواء فوق الدرزة، يضطرب التدفق بحيث تواجه الكرة قوة ديناميكية هوائية جانبية: أي قوة رفع. تتذبذب الكرة بطريقة غريبة جدا. من الصعب إطلاق الكرة دون جعلها تدور ويتطلب ذلك مهارة عالية. في بعض الأحيان، يلجأ الرامون الذين لا يستطيعون قذف كرة المفاصل بطريقة قانونية لتزييت أصابعهم بحيث تنزلق الكرة من أيديهم دون دوران. ومثل شبيهتها القانونية، فإن ما يسمى بكرة البصاق تتذبذب بشكل كبير ويصعب ضربها. وهذا هو الحال أيضاً في الكرة المخدوشة.

تحقق من فهمك #٤: منتصف ملعب كرة التنس (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

إحدى الضربات الصعبة والفعّالة في لعبة التنس هي ضربة دوران القمة البطيئة، والتي تدور فيها قمة الكرة بعيدا عن اللاعب الذي يضربها. في أي اتجاه تتجه قوة الرفع المؤثرة على هذه الكرة؟



٦-٣ الطائرات

لقد أعددنا الآن لقمة آلات الديناميكا الهوائية، ألا وهي الطائرات. كونها متحررة من أي اتصال بالأرض، فإن الطائرات تتأثر فقط بقوى الديناميكا الهوائية والجاذبية، على أمل أن تكون بهذا الترتيب. على الرغم من مظهر الطائرات المعقد، إلا أنها تستخدم مبادئ فيزيائية سبق أن فحصناها بنجاح. لكن في حين يعرّج هذا القسم على العديد من المفاهيم المألوفة، إلا أنه يستكشف حقولاً جديدة أيضا. على سبيل المثال، ربما تكون قد عرفت ما هو نوع قوة الديناميكا الهوائية التي تحمل الطائرة في الهواء، لكن ما هو نوع قوة الديناميكا الهوائية التي تبقيها متحركة للأمام؟

أسئلة للتفكير:

لماذا تكون أجنحة الطائرات الصغيرة والتي تُدفع بالمراوح كبيرة نسبيا ومتقوسة مقارنة بأجنحة الطائرات النفاثة؟ لماذا تمدّد الطائرات التجارية شرائح معدنية وأجنحة إضافية متحركة أثناء الإقلاع والهبوط؟ ما الذي يدفع الطائرات للأمام أثناء تحليقها؟ كيف يمكن لبعض الطائرات أن تطير مقلوبة رأساً على عقب؟ لماذا تستخدم معظم الطائرات التجارية السريعة محركات نفاثة وليس مراوح؟

تجارب يمكن القيام بها:

أفضل تجربة لهذا القسم هي أن تسافر بالطائرة أو على الأقل تزور المطار وتشاهد الطائرات.

حينما تجلس في الطائرة أثناء الإقلاع، اشعر بالطائرة وهي تتسارع للأمام. إذا كنت راكباً طائرة تجارية، لاحظ تمدّد الشرائح المعدنية والأجنحة الإضافية المتحركة والمتصلة بالأجنحة الرئيسية أثناء الإقلاع، والتي تجعل الأجنحة أكثر اتساعاً وأكثر تقوساً. كيف يمكن لهذه الزيادة في العرض والتقوس مساعدة الطائرة في الإقلاع؟ يحافظ قائد الطائرة على إبقائها على الأرض إلى أن تصل لسرعة مناسبة، ثم يحرفها بسرعة للأعلى نـحو السماء. تنسلخ دوامة خفية من الهواء مبتعدة عن حافة ذيل الجناح فتقلع الطائرة عن الأرض.

بمجرد أن تُحمل الطائرة في الجو، فإنها تضم إليها أجهزة هبوطها، والشرائح المعدنية، والأجنحة الإضافية المتحركة. راقب حافة ذيل كل جناح عندما تنعطف الطائرة أو تغير من ارتفاعها؛ سوف تشاهد أسطح متعددة هناك تتحرك للأعلى أو للأسفل. تحدث حركات مماثلة في ذيل الطائرة. كيف يمكن لهذه الأسطح التحكم في توجيه الطائرة؟ عندما تقترب الطائرة من محطتها، فإنها تستعد للهبوط. مرة أخرى تمدّد الشرائح المعدنية والأجنحة الإضافية المتحركة. راقب ارتفاع وانخفاض ألواح الإعاقة الموجودة فوق الأجنحة بصوتها الصاخب. كيف تؤثر هذه الأسطح على قوة مقاومة الهواء المبذولة على الطائرة؟ تتمدد أجهزة هبوط الطائرة، وتلامس مدرج الهبوط. تبدأ المراوح أو المحركات النفاثة بتبطئة الطائرة فجأة، بمساعدة ألواح الإعاقة المتصلة بالأجنحة. اشعر بتسارع الطائرة للخلف. تنسلخ دوامة خفية أخرى من الهواء مبتعدة عن حافة ذيل الجناح، تدور باتجاه معاكس للدوامة الأولى، وتنتهي الرحلة.

أجنحة الطائرات: الانسيابية

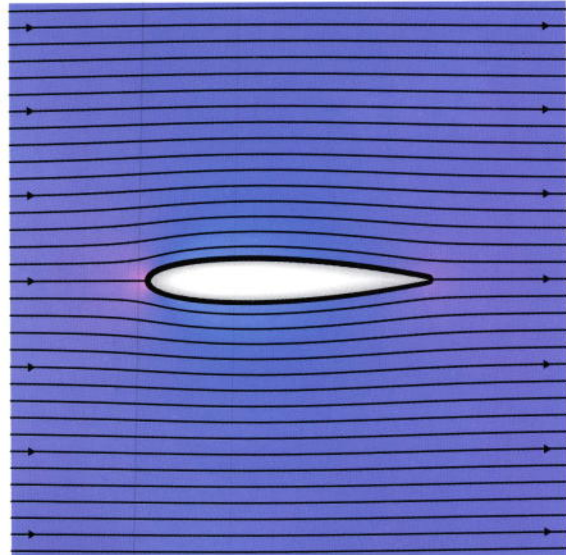
من المحتمل أنك قد أدركت قبل الآن أن الطائرة تُدعم أثناء تحليقها بواسطة قوة رفع للأعلى على أجنحتها وأن قوة الرفع هذه تأتي من حرف تدفق الهواء المار للأسفل. يعد كل جناح مُنساباً هوائياً، أي سطح ديناميكي هوائي مصمم هندسياً للحصول على قوى رفع وقوى مقاومة محددة من الهواء المتدفق المار به. وأكثر تحديدا، فإن كل جناح مشكّل وموجّه بحيث ينحرف تيار الهواء المتدفق فوق الجناح أثناء التحليق للأسفل باتجاه سطحه العلوي بينما ينحرف التيار الهوائي تحت الجناح للأسفل مبتعداً عن سطحه السفلي. هذه الانحرافات مرتبطة بالتغيرات في الضغط بالقرب من الجناح نفسه وهي مسؤولة عن قوة الرفع للأعلى والتي تجعل الطائرة معلقة في السماء.

ولكن للحصول على فهم أكثر شمولية عن كيفية قيام الجناح بإنشاء هذا الرفع، دعنا نذهب في رحلة. تخيل نفسك في طائرة بدأت للتو بالتحرك على المدرج. من منظورك، يبدأ الهواء بالتدفق مروراً بكل من أجنحة الطائرة. عندما يواجه هذا الهواء المتحرك الحافة الأمامية للجناح، فإنه ينفصل لتيارين هوائيين: أحدهما يتحرك فوق الجناح والآخر تحته (شكل 1.3.6). تستمر هذه التيارات الهوائية في حركتها إلى أن تغادر حافة ذيل الجناح. بما أن مقدمة الطائرة ما زالت على الأرض، فإن الجناح أساساً أفقي وتدفق الهواء حوله بسيط ومتناظر.

بما أن الجناح لا يقوم بحرف تدفق الهواء بعد، فإنه لا يواجه أي قوة رفع، بل فقط مقاومة الهواء. لكن مع أن هذه المقاومة تدفع الطائرة باتجاه الريح وبالتالي عكس حركتها للأمام على طول المدرج، إلا أنها ضعيفة بشكل مدهش. إن الجناح يكاد لا ينتج أي أثر اضطرابي وبالتالي لا يواجه أي مقاومة ضغطية تقريبا. معظم المقاومة القليلة التي تواجهها مقاومة لزوجة، أساسها احتكاك السطح بالهواء المار.

بالرغم من أن قلة مقاومة الجناح للهواء يجب أن تفاجئك، إلا أنه من المحتمل أنك تعتبرها أمراً مسلماً به. وهذا بسبب أنك كثيراً ما لاحظت أن مثل تلك الأجسام «الانسيابية» تخترق الهواء بشكل جيد جدا. هناك شيء ما حول كون الذيل طويلاً ونحيلاً يسمح للجناح أن يتجنب فصل التدفق والأثر الاضطرابي والذي يحدث خلف كرة غير انسيابية.

الشيء الذي يجعل الجناح الأفقي انسيابياً هو الارتفاع الشديد للتدرج في ضغط الهواء بعد المنطقة الأوسع فيه. مع أن هذا الارتفاع اللطيف في الضغط يدفع طبقة الجناح الحدّية إلى الخلف، أي عكس اتجاه التدفق، إلا أن القوة التي يبذلها ضعيفة جدا بحيث لا تتوقف الطبقة. وكون طبقة الجناح الحدّية مدفوعة للأمام بواسطة قوى اللزوجة من تيار الهواء المتدفق بحرية



شكل ١،٣،٦: يعد جناح الطائرة منساباً هوائياً ويكون تدفق الهواء حوله طبقيا. هذا الجناح الأفقي متناظر، الجزء العلوي والسفلي، وينفصل تدفق الهواء بالتساوي لتيارين هوائيين فوق الجناح وتحته. بما أن الجناح لا يحرف تدفق الهواء، فإنه لا يواجه أي قوة رفع.

يجعلها مستمرة في الحركة للأمام إلى أن تصل حافة ذيل الجناح فلا يحدث أبداً أي انفصال في التدفق. لا ينتج الجناح أي أثر اضطرابي تقريباً ولا يواجه أي مقاومة ضغطية تقريباً.

تحقق من فهمك #١: التشريح خلال الهواء (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

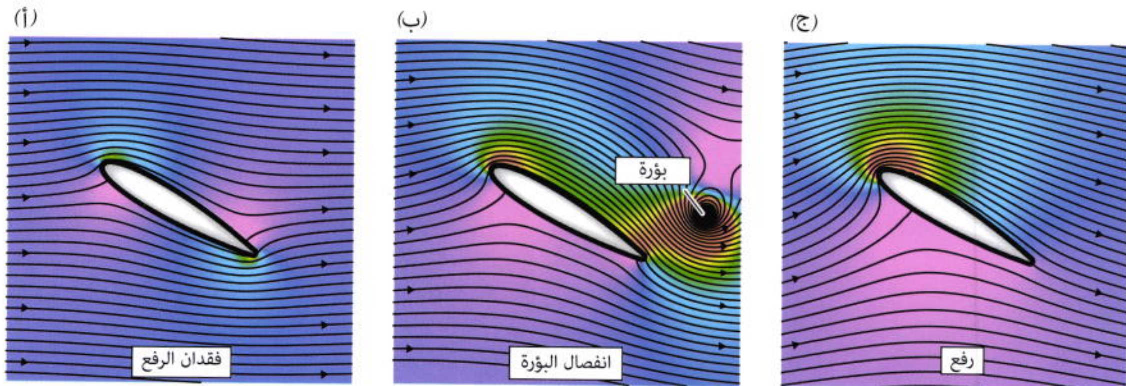
أسرع الدراجات هي التي لها أسطح انسيابية – أي أغطية انسيابية تخفض مقاومة الهواء بشكل كبير. كيف تعمل تلك الأسطح الانسيابية؟

أجنحة الطائرة: إحداث الرفع

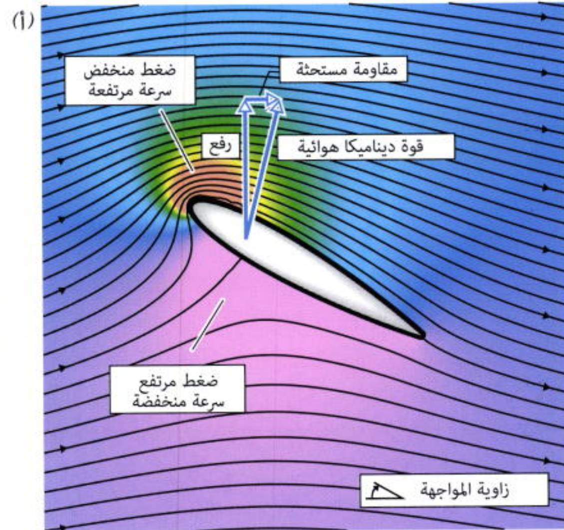
بهذه الكمية القليلة من مقاومة الهواء، تتسارع الطائرة للأمام بسرعة وعاجلاً ما تصل لسرعة الإقلاع. عندها يرفع القائد مقدمة الطائرة بحيث لا تعود أجنحتها أفقية وتبدأ بمواجهة قوى رفع للأعلى. سريعاً ما تتجاوز قوة الرفع الكلية للطائرة وزنها فتبدأ بالتسارع للأعلى نحو السماء. الطائرة تحلق!

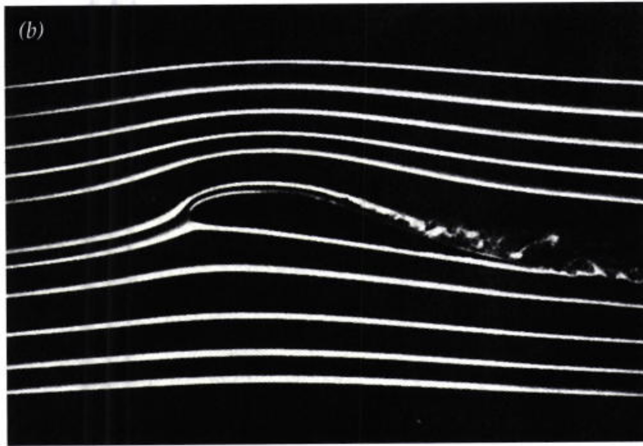
لكن دعنا نلقي نظرة أقرب للحظة الإقلاع. إذا أمكنك رؤية تدفق الهواء وكنت منتبهاً بشدة، فسوف تلاحظ سلسلة رائعة من الأحداث والتي تبدأ بميل الأجنحة للأعلى.

في بادئ الأمر، يستمر الهواء المتدفق حول الأجنحة المائلة في التحرك أفقياً في المتوسط، على الرغم من أنه يُصبح شكلاً غريباً (شكل ٢,٣,٦ أ). كل من التيارين الهوائيين، أحدهما فوق الجناح المائل والآخر تحته، ينعطف مرتين – مرة للأعلى ومرة للأسفل. كما شاهدنا أثناء دراستنا للكرات، عندما ينعطف تيار الهواء باتجاه الجناح، فإن الضغط قريبا من الجناح يكون أقل من الضغط الجوي وعندما ينعطف تيار الهواء بعيدا عن الجناح، فإن الضغط قريبا من الجناح يكون أعلى من الضغط الجوي. بما أن كل تيار هوائي ينعطف بالتساوي نحو أو بعيدا عن الجناح، فإنه لا يواجه أي انحراف إجمالي أو أي تغير ضغط متوسط وبالتالي لا يوفر للجناح أي رفع إجمالي.



شكل ٢,٣,٦: (أ) على الرغم من أن حافة هذا الجناح الأمامية تم إمالتها للأعلى، فأعطي زاوية مواجهة موجبة، إلا أن تدفق الهواء حوله متناظر نسـبيا ولا يُحدث أي رفع. (ب) الالتواء عند حافة ذيل الجناح غير مسـتقر وينفصل بعيداً على هيئة دوامة أفقية. (ج) التدفق الناتج ينحرف للأسفل ويواجه الجناح قوة رفع للأعلى.





بإذن من توماس ميلر

شكل ٣,٣,٦: (أ) إن جناح الطائرة هذا مشكّل وموّجه بحيث ينعطف كلا التيارين الهوائيين، فوق الجناح وتحته، للأسفل. يواجه الجناح قوة ديناميكية هوائية كبيرة تشير للأعلى وقليلاً باتجاه الرياح. المركبة العلوية لهذه القوة هي الرفع. المركبة باتجاه الرياح هي المقاومة المستحثة. (ب) توضح آثار دخانية في نفق هوائي تدفق الهواء مروراً بجناح.

لكن التيار الهوائي السفلي ينعطف بشكل حاد حول حافة ذيل الجناح، أي يلتوي للأعلى. يجعل القصور الذاتي للهواء مثل هذا الالتواء غير مستقر وقريباً ما يبتعد عن حافة ذيل الجناح على شكل دوامة أفقية من الهواء (شكل ٢,٣,٦ ب). بعد فصل هذه الدوامة، يؤسس الجناح نمط تدفق مستقر يمر فيه كلا التيارين الهوائيين بسلاسة بعيدا عن حافة ذيل الجناح (شكل ٢,٣,٦ ج)، وتسمى هذه الحالة حالة كوتّا (Kutta Condition) نسبة لعالم الرياضيات الألماني م. ويلهلم كوتّا (1867-1944م).

في هذا النمط الجديد، يكون التيار الهوائي المتدفق فوق الجناح أطول من التيار الهوائي المتدفق تحته وكلاهما ينعطف للأسفل (شكل ٣,٣,٦). ينعطف التيار الهوائي العلوي أساساً باتجاه الجناح، بحيث يكون ضغط الهواء فوق الجناح مباشرة أقل من الضغط الجوي (انحراف باتجاه الأحمر) وسرعته مزادة (ضيق المسافات بين خطوط الانسياب). على النقيض من ذلك، ينعطف التيار الهوائي السفلي أساساً بعيداً عن الجناح، بحيث يكون ضغط الهواء تحت الجناح مباشرة أعلى من الضغط الجوي (انحراف باتجاه البنفسجي) وسرعته منقوصة (اتساع بين خطوط الانسياب). الآن ضغط الهواء تحت الجناح أعلى من ضغطه فوقه، لذا فإن هذا النمط الجديد للتدفق ينتج قوة رفع للأعلى. الهواء الآن يدعم طائرتك وإلى الأعلى تطير.

طريقة أخرى للتفكير حول هذا الرفع هو كانحراف في تدفق الهواء. يقترب الهواء من الجناح أفقيا لكنه يبتعد عنه متوجهاً نحو الأسفل بعض الشيء. لإحداث هذا الانحراف، يجب أن يدفع الجناح تدفق الهواء للأسفل. كرد فعل، يدفع تدفق الهواء الجناح للأعلى ويُحدث رفعاً. بعبارة أخرى، ينقل الجناح كمية حركة للأسفل للهواء ونتيجة لذلك يُترك بكمية حركة للأعلى. هذان التفسيران للرفع – منظور برنولي من أن الرفع يحدث نتيجة اختلاف الضغط فوق وتحت الجناح ومنظور نيوتن من أن الرفع يحدث نتيجة انتقال كمية الحركة للهواء – متكافئان تماما وصحيحان على حد سواء.

ولكن القوة الديناميكية الهوائية الإجمالية المبذولة على الجناح ليست عمودية تماما على الهواء المتدفق؛ فهي تميل قليلا للأسفل. المركبة العمودية لهذه القوة الديناميكية الهوائية هي الرفع، لكن المركبة للأسفل هي نوع جديد من قوى المقاومة الهوائية – المقاومة الهوائية المستحثة. المقاومة الهوائية المستحثة هي نتيجة حفظ الطاقة: بالإضافة إلى نقل كمية حركة للهواء المار، فإن الجناح ينقل أيضاً بعض الطاقة له. يستخلص الهواء هذه الطاقة من الجناح بدفع الجناح للأسفل بالمقاومة الهوائية المستحثة وبالتالي القيام بشغل سالب عليه. بما أن المقاومة الهوائية المستحثة ليست مستحبة، فإن الطائرة تحاول تقليلها

٦٥ لمصممي الطائرات أن يقللوا من مخاطر التعطل بإضافة أجهزة تحكم خاصة بالطبقة الحدّية لطائراتهم. توفر شرائح معدنية ضيقة، تسمى مولدات الدوامات، والتي تبرز للأعلى من أسطح الأجنحة، اضطراباً في الطبقات الحدّية فوق الأجنحة. يسمح هذا التدفق الاضطرابي للهواء ذي الطاقة العالية أن يختلط مع الطبقات الحدّية بحيث يمكنهم الاستمرار للأمام نحو الضغط المرتفع. تساعد هذه العملية على إبقاء التيارات الهوائية متصلة بالأسطح.

باستخدام أكبر ما يمكن من كتلة الهواء للحصول على قوة رفعها. تحمل الكتلة الكبيرة من الهواء كمية حركة الطائرة للأسفل وغير المرغوب بها بينما تتحرك للأسفل بسرعة أقل وبطاقة حركية أقل. بما أن الأجنحة الأكبر تحصل على قوة رفعها من كتل الهواء الأكبر، فإنها تواجه مقاومة هوائية مستحثة أقل.

لسوء الحظ، الأجنحة الأكبر لها أيضا مساحة سطح أكبر وتواجه مقاومة لزوجة أكثر، لذا فإن الحجم الأكبر ليس دائما أفضل. وبما أن شكل الجناح وسرعة الهواء تؤثران على القوى الديناميكية الهوائية أيضا، لذا فإن الأجنحة يجب أن تتناسب بدقة مع طائراتها. إن الطائرات المروحية الصغيرة والتي تتحرك ببطء خلال الهواء تحتاج أجنحة كبيرة نسبيا ومتقوسة بشكل كبير لدعمها. تلك الأجنحة في الغالب غير متناظرة - أي أكثر تقوسا في الأعلى منه في الأسفل للاستخدام الأقصى للهواء المحدود البطيء الذي تواجهه كل ثانية. إن الطائرات العسكرية والتجارية تطير بسرعة أكبر وتواجه كمية هواء ذي سرعات عالية أكثر بكثير كل ثانية ، لذا يمكنها الطيران بأجنحة صغيرة نسبيا ومتوسطة التقوس.

لكن حتى عند السرعات الثابتة، يمكن تعديل قوة رفع الجناح بتغيير زاوية المواجهة - أي الزاوية التي يواجه بها الجناح الهواء المتدفق. كلما زادت زاوية المواجهة، زاد انعطاف التيارين الهوائيين وزادت قوة رفع الجناح. بما أن الأجنحة مثبتة بصلابة على الطائرة، فإن قائد الطائرة يقوم بإمالة مقدمة الطائرة للأعلى لزيادة قوة الرفع وللأسفل لتقليلها. ولهذا فإن رفع مقدمة الطائرة أثناء الإقلاع هو ما يجعل الطائرة في النهاية تثب للهواء.

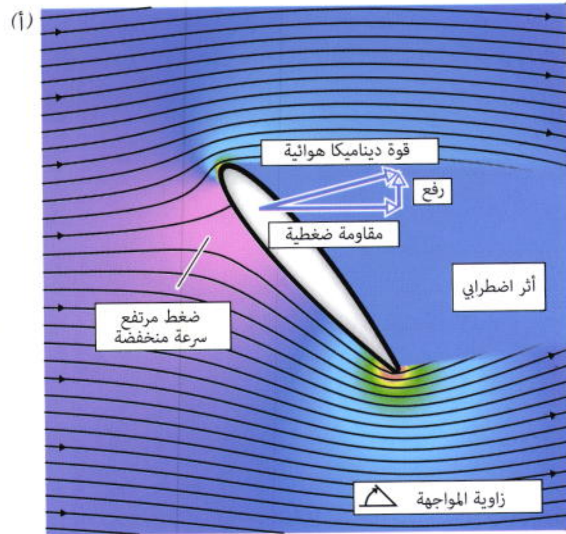
بما أن قوة الرفع تعتمد بشدة على زاوية مواجهة الجناح، فإن بعض الطائرات يمكنها أن تطير مقلوبة رأسا على عقب. طالما أن الجناح المقلوب مائل بشكل صحيح، فإنه يحصل على قوة رفع للأعلى ويدعم الطائرة. لكن هذا العمل يكون أسهل عندما يكون لجناح الطائرة نفس التقوس في أعلاه وأسفله. ولهذا كثيراً ما يستخدم طيارو المغامرات والذين يحلقون دائما رأسا على عقب طائرات رياضية لها أجنحة متناظرة أو شبه متناظرة.

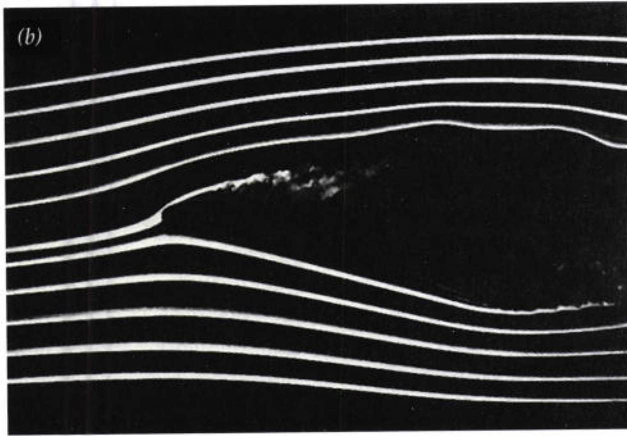
تحقق من فهمك #٢: النفخ في الريح (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

يتقوس شراع مركب شراعي صغير للأمام وللخارج بحيث ينعطف الهواء المتحرك حول سطح الشراع الخارجي باتجاه الشراع، بينما ينعطف الهواء المتحرك عبر سطحه الداخلي بعيدا عن الشراع. كيف يمكن لهذا الترتيب أن يدفع المركب الشراعي عبر الماء؟

قوة الرفع لها حدود: تأخر الجناح

هناك حد لمقدار قوة الرفع التي يمكن أن يحصل عليها قائد الطائرة بزيادة زاوية مواجهة الجناح لأن إمالة الجناح يحوله تدريجياً من انسيابي إلى منثلم (غير مستدق)، أي يكون له ارتفاع سريع في ضغط الهواء بعد منطقته الأوسع. كما رأينا في الكرات، فإن الأجسام المنثلمة في الغالب تواجه انفصالاً في تدفق الهواء ومقاومة ضغطية. بالتأكيد، بعد زاوية مواجهة معينة، فإن تيار الهواء فوق الجناح ينفصل عن سطحه ويتأخر الجناح. يبدأ هذا الانفصال عندما يتوقف الهواء في الطبقة الحدّية العلوية بسبب الضغط السريع الارتفاع خلف منطقة الجناح الأكثر اتساعا. بمجرد أن تتعطل هذه الطبقة الحدّية، فإنها تكشط معظم تيار الهواء بعيدا عن السطح العلوي للجناح.
إن التيار الهوائي المنفصل فوق الجناح المتعطل يترك عاصفة موجية من الاضطراب تحته (شكل ٤،٣،٦). هذا الانفصال في تيار الهواء هو كارثة ديناميكية هوائية للطائرة. بما أن الضغط المتوسط فوق الجناح يتزايد، فإن الجناح يفقد معظم قوة رفعه. وظهور الأثر الاضطرابي يبشّر بوصول مقاومة ضغطية شديدة. فتتباطأ الطائرة بشكل مثير وتسقط مثل الصخرة.
لتجنّب التعطل، يُبقي قادة الطائرات زاوية المواجهة في مدى آمن. لكن احتمالية التعطل تحدّ أيضا من السرعة الدنيا التي ستطير بها الطائرة. حينما تتباطأ الطائرة، يجب على قائد الطائرة أن يزيد من زاوية مواجهتها للمحافظة على قوة رفع كافية. تحت سرعة محددة، لا يمكن للطائرة أن تحصل على قوة الرفع تلك دون إمالة أجنحتها إلى أن تتعطل. لا تعود





بإذن من توماس ميلر

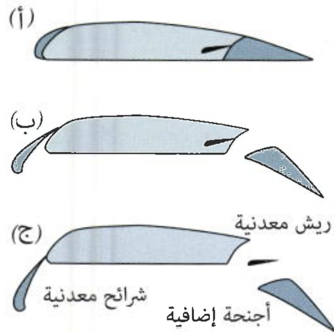
شـكل ٤،٣،٦: (أ) يتعطل الجناح عندما ينفصل تيار الهواء فوق الجناح عن سـطحه. يتكون تجويف من الهواء المضطرب فوق الجناح جاعلاً إياه أقل كفاءة. تتناقص قوة رفع الجناح لأن متوسـط الضغط فوق أسـمك منطقة في الجناح يصبح أعلى، وتزيد المقاومة لأن متوسـط الضغط فوق حافة ذيل الجناح يصبح أقل. (ب) توضح آثار دخانية في نفق هوائي كيف أن الهواء ينفصل عن السطح ويصبح مضطرباً أثناء تدفقه فوق جناح متعطل.

الطائرة قادرة على الطيران.

لتجنب التعطل، يجب أن لا تطير الطائرة أبدا بسرعة أقل من هذه السرعة الدنيا، وخصوصا أثناء الإقلاع والهبوط. بالنسبة للطائرة المروحية الصغيرة ذات الأجنحة المتقوسة كثيرا، فإن السرعة الدنيا للطيران منخفضة جداً بحيث لا تشكل قضية غالباً. ولكن بالنسبة للطائرة التجارية، فإن السرعة الدنيا هي حوالي 220km/h (140mph). إن الطائرات التي تقلع أوتهبط بهذه السرعة ستتطلب مدارج طويلة للوصول لهذه السرعة أو للتخلص منها. بدلا من ذلك، للطائرات التجارية النفاثة أجنحة يمكن أن يتغير شكلها أثناء الطيران. تتحرك شرائح معدنية طويلة للأمام وللأسفل من الحواف الأمامية للأجنحة، وتتحرك أجنحة إضافية متحركة للخلف وللأسفل من حواف ذيل الجناح (شكل ٥،٣،٦). بتمدد كلٍّ من الشرائح المعدنية والأجنحة الإضافية المتحركة، يصبح الجناح أكبر وأشد تقوسا، شبيهاً بأجنحة الطائرة المروحية الصغيرة، وتنخفض سرعة الطيران الدنيا الآمنة لقيمة معقولة 150km/h (95mph). تظهر أيضا ريش معدنية قريبة من الأجنحة الإضافية المتحركة أثناء الهبوط لتوجيه الهواء ذي الطاقة العالية من تحت الجناح إلى الأجنحة الإضافية المتحركة. هذا الفيض من الهواء يحافظ على حركة الطبقة الحدّية باتجاه الريح ويساعد على منع التعطل. (لطريقة أخرى لمنع التعطل، (انظر٦٥)

بمجرد أن تهبط الطائرة التجارية النفاثة، تُمال ألواح مستوية موجودة على أسطح أجنحتها العلوية للأعلى وتتسبب في انفصال تدفق الهواء عن أعلى الأجنحة. إن الاضطراب الناتج المنشأ من هذه العوائق يقلل من قوة رفع الأجنحة ويزيد من مقاومتها للهواء، بحيث لا تبدأ الطائرة عرضياً بالطيران مرة أخرى. حتى قبل الهبوط، تستخدم العوائق في بعض الأحيان لتبطئة الطائرة ومساعدتها للهبوط بسرعة باتجاه المطار.

أثناء التحليق، يقوم الجناح بأكثر من مجرد دفع الهواء المار للأسفل؛ فهو يقوم أيضا بلف الهواء القريب من طرفه. بما أن ضغط الهواء تحت الجناح أعلى من ضغط الهواء فوقه، فإن الهواء يميل للتدفق حول طرف الجناح من الأسفل للأعلى. عاجلاً تترك الطائرة هذا الهواء خلفها، لكن ليس قبل أن يكتسب الهواء الكثير من كمية الحركة والطاقة الحركية. وبالتالي تظهر دوامة دائرية من طرفي الجناحين وتترك أثرها خلف الطائرة



شـكل ٥،٣،٦: عند سرعة التحليق، تكون أجنحة الطائرة أسطحاً انسيابية متوسطة التقـوس (أ). لكـن أثنـاء الإقـلاع (ب) والهبـوط (ج)، تتمـدد شرائـح معدنية طويلة مـن الحواف الأماميـة للأجنحة، وتتمـدد أجنحـة إضافيـة متحركـة من حـواف ذيـل الجنـاح. تصبح الأسـطح الانسـيابية أكثر تقوسـا، فتولد قوة رفع أكـبر عنـد السرعـات المنخفضـة. أثناء الهبـوط، تتمـدد أيضـا ريـش معدنية للتحكم بالطبقة الحدّية وتجنب تعطلها.



شـكل ٦،٣،٦: طـرف الجناح الرأسي يمنع الهواء مـن التدفق حـول نهاية الجنـاح، وهـو حركة قد تـترك أثر دوامـة قوية في الهواء خلف الطائرة إذا لم يوجد الطرف الرأسي. مثل هذه الدوامات التي تنتج مـن طرف الجنـاح تهدر الطاقـة وتشـكل خطـراً للطائرات الأخرى.

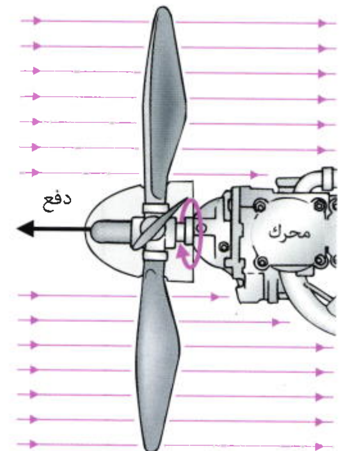
لعدة كيلومترات، مثل إعصار خفي. يمكن لدوامة طرف جناح طائرة جمبو نفاثة أن تقلب طائرة صغيرة تطير خلالها أو أن تعطي الركاب في طائرة أكبر حجما إثارة غير متوقعة. للأمان، يحرص مهندسو الملاحة الجوية على منع الطائرات من التحليق خلال آثار بعض ويرتبون مواعيد الطائرات ليكون هناك فرق على الأقل ٩٠ ثانية بينهم على المدارج. بعض الطائرات الحديثة لها امتدادات رأسية عند طرف الجناح والتي تقلل من هذه الدوامات، لتوفير الطاقة وأيضا لتقليل المخاطر (شكل ٦،٣،٦).

تحقق من فهمك # ٣: الطيران المثير (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

في العادة يقوم قائد الطائرة بإمالة مقدمة الطائرة للأعلى للحصول على ارتفاع. لكن إذا حاول قائد الطائرة أن يجعل الطائرة ترتفع بسرعة كبيرة، فإن الطائرة ستبدأ بالسقوط فجأة. ما الذي يحدث؟

المراوح

لكي تحصل الطائرة على قوة رفع؛ فإنها تحتاج سرعة طيران؛ أي يجب أن يتدفق الهواء عبر أجنحتها. وبما أن قوى المقاومة تدفع الطائرة باتجاه الرياح، فإن الطائرة التي في تحليق مستوٍ لا يمكنها أن تحافظ على سرعة طيرانها ما لم يدفعها شيء ما عكس اتجاه الرياح. لهذا يكون للطائرة مراوح ومحركات نفاثة: لدفع الهواء للخلف لكي يدفع الهواء الطائرة للأمام، فعل ورد فعل.

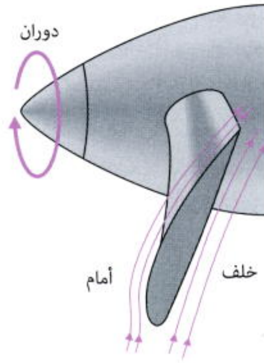


شـكل ٧،٣،٦: تتصرف المروحـة مثل جناح يـدور. أثناء دوران المروحـة، فإن شرائحها تُحدث قوة رفـع في الاتجاه الأمامي. تدفع قـوة الرفع هـذه المحرك والطائـرة للأمام خلال الهواء، لذلك تسمى دفعاً.

إن المراوح هي جمع من أجنحة تدور. تمتد من محورها المركزي ريشتان أو أكثر والتي سوية تشكل مروحة معقدة (شكل ٧،٣،٦). لهذه الريش مقاطع أسطح انسيابية وهي مصممة لإنشاء قوى رفع للأعلى عندما تدور المروحة وتتحرك الريش خلال الهواء.

حينما تتحرك ريشة المروحة بسرعة خلال الهواء، فإن التيارات الهوائية المنعطفة حول تلك الريشة تواجه تغيرات في الضغط (شكل ٨،٣،٦). ينعطف التيار الهوائي الأمامي باتجاه السطح الأمامي للريشة، فينخفض الضغط أمام الريشة لأقل من الضغط الجوي. وينعطف التيار الهوائي الخلفي بعيدا عن السطح الخلفي للريشة، فيرتفع الضغط خلف الريشة لأعلى من الضغط الجوي. الفرق الناتج في الضغط يبذل قوة رفع للأمام أو قوة دفع على المروحة.

لريش المروحة جميع المميزات، الجيدة والسيئة، التي لأجنحة الطائرة. يزيد دفعها بالحجم، وبتقوّس سطحها الأمامي، وبدرجتها (أي زاوية مواجهتها)، وبسرعتها في الهواء؛ بعبارة أخرى، كلما كبرت المروحة زادت سرعة



شكل ٨,٣,٦: حينما تدور ريشة المروحة، يُنشئ تدفق الهواء حولها ضغطاً منخفضاً أمامها (يسار) وضغطاً مرتفعاً خلفها (يمين). تواجه الريشة قوة رفع تدفع المروحة والطائرة للأمام (باتجاه اليسار). تميل المقاومة الهوائية المستحثة لتبطئة دوران المروحة.

٧◊ أحد مصادر الصوت الرئيسة في الغوّاصات هو الاضطراب الناشئ من مراوحها. لتقليل هذا الاضطراب، فإن مراوح الغوّاصات النووية الحديثة تصمم لتجنب انفصال وتعطل تدفق الماء.

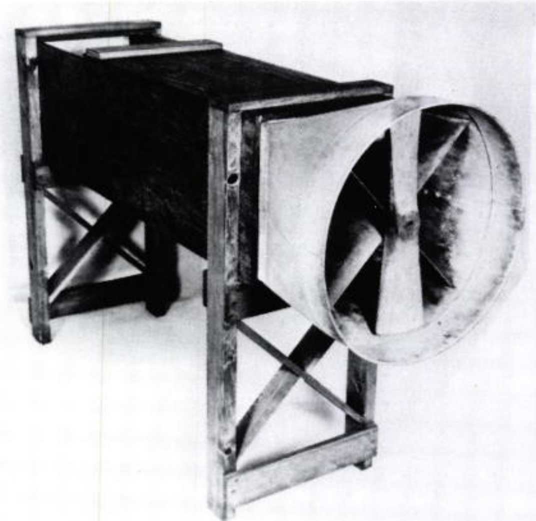
دورانها، وكلما زادت زاوية ريشها في مواجهة الرياح أنتجت قوة دفع أكبر. إن الريش نفسها لها شكل ملتف لتتكيف مع التغيرات في سرعتها في الهواء على طول امتدادها، من المحور إلى الطرف.

ومثل الجناح، فإن المروحة تتعطل عندما ينفصل تدفق الهواء عن الأسطح الأمامية لريشها؛ فتصبح فجأة خلاطاً هوائياً أكثر من كونها مروحة. كان سلوك تعطل الأجنحة هذا هو حالة التشغيل القياسية في المراوح الجوية والبحرية (انظر◊٧) قبل اكتشاف ويلبر رايت في عام ١٩٠٢ (انظر◊٨) . كان الأخوان رايت من أوائل الناس في دراسة الديناميكا الهوائية باستخدام النفق الهوائي (شكل ٩,٣,٦)، وسمح لهم توجههم المنهجي العلمي للديناميكا الهوائية بإنجاز أول تحليق آلي (شكل ١٠,٣,٦).

تواجه المروحة أيضا مقاومة هوائية مستحثة. حينما تدفع قوة دفع المروحة الطائرة خلال الهواء، فإن المقاومة الهوائية المستحثة تنتزع طاقة من المروحة. لإبقاء دوران المروحة ثابتا، يجب أن يقوم المحرك بشغل على المروحة. تشغّل المراوح بمحركات ترددية ذات أداء عال، مثل تلك الموجودة في السيارات، أو في المحركات النفاثة التي سنناقشها لاحقا.

إن المراوح ليست مثالية؛ حيث أن لها ثلاثة قيود خطيرة. أولا: تبذل المراوح عزما دورانيا على الهواء المار، فيبذل ذلك الهواء عزما دورانيا على المراوح. ردة فعل هذا العزم الدوراني يمكنها أن تقلب طائرة صغيرة. لتقليل مشاكل العزم الدوراني، تستخدم بعض الطائرات زوجا من المراوح الدورانية المتعاكسة والطائرات ذات المروحة الأحادية تضع مراوحها في الأمام غالباً، حتى يستطيع الهواء المدار أن يعيد كمية الحركة الدورانية لها أثناء مروره فوق أجنحتها.

٨◊ بالإضافة إلى إنجاز أول رحلة طائرة دفع ذاتي في عام ١٩٠٣م، فلقد كان أورفل (١٨٧١-١٩٤٨م) وويلبر (١٨٦٧-١٩١٢م) رايت (طائريان أمريكيان) أخصائيين متميزين في الديناميكا الهوائية. في عام ١٩٠٢، كان ولبر أول شخص يدرك أن المروحة هي في الحقيقة جناح يدور. قبل زمنه كانت المراوح لا تزيد عن كونها جدافات دورانية، لها فعالية أكبر في خلط الهواء من دفع الطائرة. جعلت مروحة ويلبر المعاد تصميمها وفق الديناميكا الهوائية الطيران ممكناً وسيطرت على تصميم الطائرات لعقد من الزمن.



شكل ٩,٣,٦: كان الأخوان رايت أخصائيين بارعين في الديناميكا الهوائية، فلقد قاما باستخدام هذا النفق الهوائي لدراسة وإتقان صناعة أجنحة ومراوح طائراتهما.

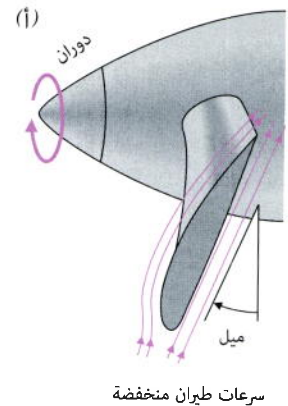
بإذن من مؤسسة سميثسونيان

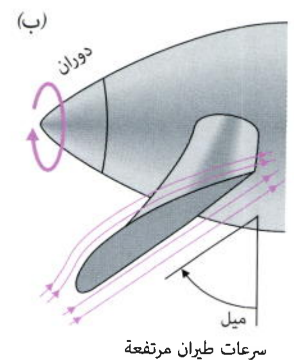


شكل ١٠,٣,٦: بدأ عصر الطيران الآلي عند الساعة 10:35 صباحا في يوم ١٧ ديسمبر ١٩٠٣، عندما رفعت طائرة الأخوين رايت أورفل رايت للهواء فوق كيتي هوك في ولاية نورث كارولينا. يقف بجانبه أخوه ويلبر في هذه الصورة الفوتوغرافية الفريدة لهذه الرحلة الطيرانية الآلية الأولى.

مشكلة ثانية في المراوح هي أن دفعها يقل عندما تزيد سرعة الطائرة الأمامية. عندما تكون الطائرة ساكنة، تتحرك ريشة المروحة خلال هواء ساكن (شكل ١١,٣,٦ أ). لكن عندما تتحرك الطائرة بسرعة، فإن الهواء يقبل على هذه الريشة ذاتها من أمام الطائرة (شكل ١١,٣,٦ ب). للمحافظة على قوة دفعها عند سرعات الطيران المرتفعة، فإنه يجب على ريشة المروحة أن تزيد من ميلها – أي يجب أن تميل للأمام – لمقابلة هذا الهواء المندفع.

المشكلة الثالثة والأكثر تثبيطا في المراوح، خصوصا في الطائرات السريعة جدا، هي مقاومة الهواء. لمجاراة الهواء المندفع في سرعات الطيران المرتفعة، يجب على المراوح أن تدور بمعدلات هائلة. أطراف الريش تتحرك بسرعة عالية تتجاوز سرعة الصوت – وهي أقصى سرعة يمكن لمائع مثل الهواء أن ينقل القوى من مكان لآخر عندها. عندما يتجاوز طرف الريشة هذه السرعة، فإن الهواء القريب من الطرف لا يتسارع إلى أن يصطدم به الطرف واقعيا. فبدلا من أن يتدفق الهواء بسلاسة حول الطرف، فإن الهواء يُشكل موجة صدمية – أي منطقة ضيقة ذات ضغط مرتفع ودرجة حرارة مرتفعة تنشأ بسبب التصادم فوق الصوتي – وتتعطل المروحة. لذلك فإن المراوح ليست مفيدة في الطائرات ذات السرعات العالية.





شكل ١١,٣,٦: عند سرعات الطيران المنخفضة (أ) تواجه ريشة المروحة هواء ساكناً تقريبا حينما تدور. عند السرعات المرتفعة (ب) يتدفق الهواء سريعا مارا بالمروحة، فيجب على الريشة أن تميل للأمام لمقابلته. تسمى زاوية مواجهة الريشة ميلها.

تحقق من فهمك #٤: توزيع الهواء

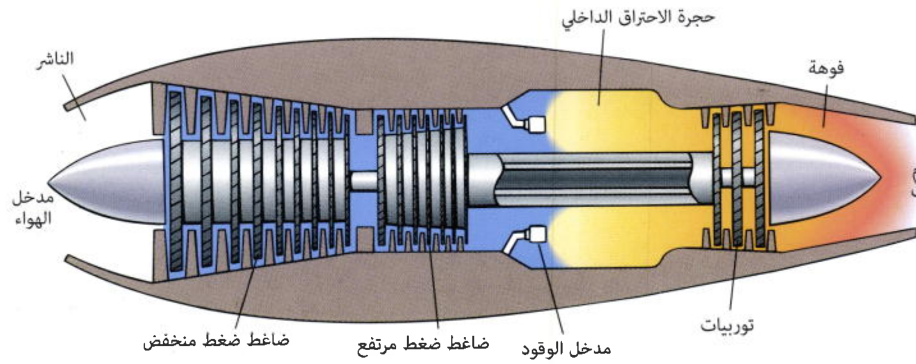
(للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

الفرق الوحيد بين المروحة المنزلية ومروحة الطائرة هو الشيء الذي يتحرك، الهواء أم الجسم. أي جوانب ريشة المروحة المنزلية يواجه ضغط الهواء الأكثر انخفاضاً، الجانب الداخلي أم الخارجي؟

المحركات النفاثة

على خلاف المراوح، تعمل المحركات النفاثة بشكل جيد في السرعات العالية. في حين تحاول المروحة أن تعمل مباشرة في الهواء ذي السرعة العالية المقترب من الطائرة، فإن المحرك النفاث يقوم بإبطاء هذا الهواء أولا لسرعة يمكن التحكم بها. للحصول على هذا التغير في السرعات، فإن المحرك النفاث يحسن استخدام معادلة برنولي.

يصور الشكل (١٣,٣,٦) المحرك النفاث. أثناء الطيران، يتدفق الهواء لقناة المدخل في المحرك أو الناشر بسرعة حوالي 800km/h (500mph)، وهي سرعة الطائرة. بمجرد دخول الهواء للناشر فإنه يتباطأ ويزداد ضغطه، لكن طاقته الكلية لا تتغير. بعدها يمر الهواء خلال سلسلة من الريش (الشفرات) الضاغطة، الشبيهة بريش



شكل ١٢,٣,٦: يعمل المحرك النفاث بضغط الهواء الداخل باستخدام سلسلة من الريش (الشفرات) الشبيهة بريش المروحة. يُخلط الوقود مع الهواء ذي الضغط العالي ويتم إشعال الخليط. يتسارع الهواء ذو الطاقة العالية والضغط العالي من مؤخرة المحرك، ويقوم بشغل على التوربينات، ويغادر بسرعة أكبر من سرعة دخوله للمحرك. قام المحرك بتسريع الهواء للخلف وواجه قوة دفع للأمام.

المروحة، والتي تدفعه لعمق أكبر داخل المحرك، ببذل شغل عليه وزيادة كل من ضغطه وطاقته الكلية. ما أن يصل الهواء لغرفة الاحتراق إلا وضغطه قد أصبح عدة أضعاف الضغط الجوي.

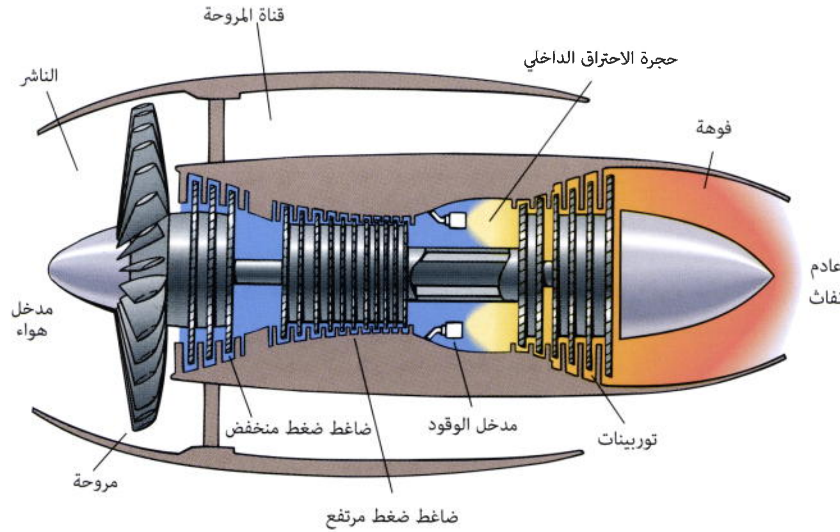
الآن يتم إضافة الوقود إلى الهواء ويُشعل الخليط. بما أن الهواء الساخن أقل كثافة من الهواء البارد، فإن العادم الساخن يأخذ حيزاً من الفراغ أكبر من ما أخذه قبل الاحتراق. علاوة على ذلك، يقسّم الاحتراق جزيئات الوقود لأجزاء أصغر والتي بالتالي تأخذ مزيدا من الحجم. يخرج هذا العادم الغازي الساخن من غرفة الاحتراق متحركاً بسرعة أكبر من سرعته عند دخوله للمحرك.

لا يزال ضغط غاز العادم مرتفعا جدا عند انسيابه خلال التوربين الشبيه بالطاحونة. يقوم الهواء ببذل شغل على ذلك التوربين وبالتالي يدير الضاغط للهواء الداخل. بعد التوربين، يتسارع الغاز ذو الضغط العالي أخيراً خلال خرطوم مخرج المحرك وينفذ للسماء الواسعة بضغط يساوي الضغط الجوي وبسرعة عالية جدا.

إجمالا، يقوم المحرك بتبطئة الهواء، ويضيف طاقة له، ثم يجعله يتسارع مرة أخرى لسرعات عالية. بما أن المحرك قد أضاف طاقة للهواء، فإن الهواء يغادر المحرك بسرعة أعلى من سرعة دخوله. الزيادة في سرعة الهواء للخلف تعني أن المحرك النفاث قام بدفعه للخلف وأنه كان رد فعل الهواء بذل قوة دفع للأمام على المحرك النفاث. بعبارة أخرى، حصلت الطائرة على كمية حركة للأمام بإعطاء الهواء المغادر كمية حركة للخلف.

إن المحرك النفاث له كفاءة في الطاقة أقل مما يمكن أن يكون عليه. بما أنه يعطي كمية حركة خلفية لكتلة صغيرة نسبياً من الهواء، فإن هذا الهواء ينتهي به المطاف بالتحرك بسرعة كبيرة وبطاقة حركية مفرطة. لجعل المحرك أكثر كفاءة، يجب أن يُعطي كمية حركة للخلف لكتلة أكبر من الهواء.

يحلّ المحرك التوربيني المروحي هذه المشكلة باستخدام محرك توربيني نفاث لتدوير مروحة ضخمة (شكل ١٣,٣,٦). بما أن هذه المروحة موجودة في قناة مدخل المحرك، فإن سرعة الهواء تتناقص وضغطه يزداد قبل أن يدخل المروحة. عندها تبذل المروحة شغلا على الهواء وتزيد ضغطه أكثر. مع أن حوالي 5% من هذا الهواء يدخل المحرك التوربيني النفاث، إلا أن معظمه يتسارع للخارج من خلف قناة المروحة ويخرج للسماء المفتوحة بضغط يساوي الضغط الجوي وسرعة زائدة. إجمالا، دفعت المروحة الهواء للخلف ودفع الهواء المروحة للأمام، منتجة بذلك قوة دفع للأمام.



شكل ١٣،٣،٦: يضيف المحرك التوربيني المروحي مروحة ضخمة لمحور المحرك التوربيني النفاث المعتاد. معظم الهواء المار خلال المروحة يتجاوز التوربين النفاث ويعود مباشرة لتيار الهواء حول المحرك. بما أن المروحة تبذل شغلا على هذا الهواء، فإنه يغادر المحرك بسرعة أكبر من السرعة التي كان عندها عند وصوله. قد حوّل الهواء كمية الحركة للأمام للمحرك والطائرة.

تماما مثل محرك التوربين النفاث، فإن المحرك التوربيني المروحي يبطئ الهواء، ويضيف له طاقة، ثم يسمح له بالتسارع لسرعات العالية. لكن بما أن المحرك التوربيني المروحي يُحرك هواء أكثر من المحرك التوربيني النفاث، فإنه يُعطي هذا الهواء طاقة أقل ويستهلك وقوداً أقل. إن المحركات الضخمة الشبيهة بالمراوح على العديد من طائرات الجمبو هي محركات توربينية مروحية. (للتعرف على نوع آخر من المحركات النفاثة (انظر٩٥)

٩٥المحـرك النفـاث التضاغطـي هو محـرك نفـاث ليـس لـه أي قطعة متحركة. يتفاعل الهـواء الذي يقترب من المحـرك بسرعات فوق صوتية مع أسطح مستدقة بعناية بحيث أن كمية حركتها الأمامية تضغطه لكثافة عالية. يضيـف المحرك بعدهـا الوقود لذلك الهـواء ذي الضغط العالي، ويشـعل الخليـط، ويسـمح الغاز السـاخن المحروق للتمدد خارج الفوهة. يدفع المحـرك هذا العـادم للخلف، ويدفع العـادم المحرك والطائـرة للأمام. على الرغم مـن أن الهواء يدخـل المحرك بسرعات فوق صوتية، إلا أنه يمر خلال غرفة الاحتراق بسرعـة أقل بكثير. في الاحتراق فوق الصـوتي داخل المحرك التضاغطـي النفاث، فإن خليط الهواء والوقود يتدفـق خلال غرفة الاحتراق بسرعـات فوق صوتية. هـذه الحركة تجعـل مـن الصعب جـدا المحافظة على الوقود مشـتعلا لأن الشعلة تميل للتدفق باتجـاه التيار وخارج المحرك. لا تسـتطيع الشـعلة التقـدم خلال الخليط بسرعة أكبر من سرعة الصوت، لذا فإنها لـن تنتشر ضد التيار بسرعة كافية تبقيها داخل المحرك وحدها.

تحقق من فهمك # ٥: الطاقة والمحركات النفاثة (للإجابة، انظر صفحة ١٩٣)

بطريقة ما، يبطئ المحرك النفاث الهواء، ويضيف له طاقة عند سرعة منخفضة، ثم يعيد الهواء لسرعات عالية. لماذا لا تهدر تبطئة الهواء الكثير من الطاقة؟

خاتمة الفصل السادس

في هذا الفصل، ألقينا نظرة على عدد من الأشياء التي تستخدم موائع متحركة للقيام بعملها. في سقاية الحديقة، رأينا كيف يتحرك الماء خلال الفتحات والقنوات. نظرنا في تأثيرات اللزوجة وأهمية معادلة برنولي في وصف تحوّل طاقة الضغط الكامنة لطاقة حركية والعكس بالعكس. ظهر نوعان من تدفق الموائع - الطبقي والمضطرب. في حين التدفق الطبقي سلس ويمكن التنبؤ بسلوكه، رأينا أن التدفق المضطرب يتضمن عدم المقدرة على التنبؤ وفوضى، وهو سلوك شائع في كوننا المعقد.

في قسم الكرات والهواء، فحصنا الطرق التي يبذل بها الهواء المتحرك قوى على الأجسام الأكبر، في كل من اتجاه الريح مثل مقاومة الهواء وفي الاتجاه العمودي مثل الرفع. تعلمنا نوعين مختلفين من قوى المقاومة وكيف يمكن التحكم فيها أو تخفيضها باختيار أشكال أو حركات الكرات.

أخيرا، في قسم الطائرات، استكشفنا الديناميكا الهوائية لتلك الآلات الرائعة. رأينا كيف تستخدم الطائرات الهواء لدعم ودفع ذاتها. وفحصنا أيضا حدود عمل الأجنحة ورأينا ما الأخطاء التي يمكن أن تحدث إذا تم تجاوز تلك الحدود. درسنا الدفع في الطائرات المروحية وفي الطائرات النفاثة ورأينا كيف أن هذه الأنظمة تتضمن معادلة برنولي والقوة للأمام التي تنشأ من دفع الهواء للخلف.

التفسير: المدفع الدوّامي

يُنشئ المدفع الدوامي حلقات دوامية - إعصارات صغيرة جدا تُحنى على شكل حلقات بحيث لا يكون لها بدايات ولا نهايات. يلتف الهواء للأمام في منتصف كل حلقة وعكسيا في الحافة الخارجية. يتكون هذا الإعصار الدائري عندما يتدفق الهواء خلال ثقب المدفع الدوامي. يتدفق الهواء للأمام في منتصف الثقب بينما تكوّن حواف الثقب التدفق العكسي حول خارج الحلقة. كل حلقة، بعد مغادرتها للمدفع، تزحف للأمام خلال الهواء المحيط إلى أن تُستهلك طاقتها الحركية فتتباطأ إلى أن تتوقف. ينتهي وجودها بالتفافها في مكانها إلى أن توقف قوى اللزوجة هواءها المتحرك.

ملخص الفصل

كيفية عمل سقاية الحديقة

حينما يتدفق الماء خلال الخرطوم، تحدد قوى اللزوجة في الخرطوم سرعته، خصوصا بالقرب من جدران الخرطوم. كلما ينعطف الخرطوم، يرتفع ضغط الماء في الجزء الخارجي للانعطاف وينخفض في الجزء الداخلي للانعطاف. عندما يصل الماء الفوهة، فإنه يتسارع خلال الفتحة الضيقة، وتزداد سرعته وينخفض ضغطه إلى أن يخرج بضغط مساوٍ للضغط الجوي ويتقوس برشاقة في الحديقة. حينما يتدفق الماء بسرعة حول العوائق، في كل من الحديقة وعند الصنبور المؤدي للخرطوم، فإن التدفق يصبح اضطرابياً وضوضائياً.

كيفية عمل الكرات والهواء

تواجه الكرة المتحركة خلال الهواء نوعين رئيسيين من أنواع قوى الديناميكا الهوائية - المقاومة والرفع. بالنسبة لكرة لا تدور حول نفسها وتسير ببطء، فإن قوة المقاومة الوحيدة التي تواجهها هي مقاومة اللزوجة؛ لا تواجه أي قوة رفع. حينما تزداد سرعة الكرة خلال الهواء، يظهر خلفها أثر اضطرابي كبير وتواجه الكرة مقاومة ضغطية. عند السرعات الأعلى، تصبح الطبقة الحدّية للهواء بالقرب من سطح الكرة اضطرابية ويتقلص حجم الأثر الاضطرابي خلف الكرة. تواجه الكرة ذات الطبقة الحدّية المضطربة مقاومة أقل مقارنة بكرة ذات طبقة حدّية طبقية، ولهذا تصمم الكرات لتستحث الطبقات الحدّية الاضطرابية.
تواجه الكرات التي تدور حول نفسها قوى رفع. تحدث هذه القوى لأن التيارات الهوائية المنعطفة والمنحرفة تدفع هذه الكرات بشكل غير متناظر. يمكن أن تتسبب قوى الرفع في انحراف الكرة أثناء تحليقها أو أخذها وقتاً طويلا بشكل مدهش في السقوط.

كيفية عمل الطائرات

يتم دعم الطائرة أثناء تحليقها بواسطة الهواء المار عبر أجنحتها. يواجه الهواء المنعطف باتجاه السطح العلوي للجناح انخفاضا في الضغط، بينما يواجه الهواء المنعطف بعيدا عن السطح السفلي للجناح ارتفاعا في الضغط. نتيجة لهذا الاختلاف في الضغط، يواجه الجناح قوة رفع للأعلى. تواجه الطائرة مقاومة أيضاً، والتي تميل لتبطئتها. لإبقاء الطائرة متحركة للأمام، تستخدم الطائرة مراوح أو محركات نفاثة. هذه الأجهزة تدفع الهواء للخلف ويستجيب الهواء بدفعها للأمام. تعمل المروحة مباشرة على الهواء المقبل، فتزيد من طاقة الهواء وتدفعه للخلف بواسطة دوران الريش. يقوم المحرك النفاث بتبطئة الهواء أولا: ثم يزيد طاقته بواسطة الوقود المحترق في الهواء، وأخيرا يجعله يتسارع مرة ثانية للخلف لسرعات مرتفعة.

قوانين ومعادلات مهمة:

١. قانون بوازيل: حجم الماء المتدفق خلال أنبوب اسطواني في كل ثانية يساوي (π/128) مضروبا في فرق الضغط (Δp) عبر ذلك الأنبوب مضروبا في قطر الأنبوب للأس الرابع، مقسوما على طول الأنبوب مضروبا في لزوجة المائع(η).

$$\text{الحجم} = \frac{\text{قطر الخرطوم} \times \text{فرق الضغط} \,.\, \pi}{\text{لزوجة المائع} \times \text{طول الخرطوم}^4 \,.\, 128} \qquad (١,١,٦)$$

٢. الانحناءات وعدم توازن الضغوط: عندما ينحني مسار مائع يتدفق في حالة استقرار، فإن الضغط على الجزء الخارجي من الانحناء يكون دائما أعلى من الضغط على الجزء الداخلي من الانحناء.

٣. عدد رينولدز: هو مقياس الأهمية النسبية للقصور الذاتي واللزوجة في تدفق المائع حول عائق ويعطى بالمعادلة: (٢,١,٦)

$$\text{عدد رينولدز} = \frac{\text{سرعة التدفق} \times \text{طول عائق} \times \text{الكثافة}}{\text{اللزوجة}}$$

تحقق من فهمك - الإجابات

٦-١ سقاية الحديقة

١. الهواء عند أسطح خيوط الصوف ساكن، ولزوجة الهواء تبطئ حركته بالقرب من الخيوط.

لماذا: على الرغم من أن الهواء الذي يحاول المرور خلال الفجوات قد لا يلامس الخيوط مباشرة، إلا أن قوى اللزوجة تميل لإبقاء كل الهواء متحركاً سوياً بنفس السرعة. بمجرد أن تمنع الخيوط بعض الهواء من المرور، فإن الهواء القريب يتباطأ بواسطة قوى اللزوجة. إن خيوط الكنزة قريبة من بعضها البعض بما يكفي لجعل قوى اللزوجة تقوم بتبطئة كل الهواء الذي يحاول المرور خلال الكنزة. تخيل محاولة سكب عسل خلال الكنزة.

٢. تُبطئ لزوجة الهواء تدفقه خلال الأنابيب. إن تحريك حجم كبير من الهواء بسرعة دون وجود اختلاف كبير في الضغط بين فتحة الدخول وفتحة الخروج يتطلب أنبوباً له قطر كبير.

لماذا: تسيطر قوى اللزوجة على تدفق الهواء خلال أنبوب طويل. حجم الهواء المتدفق خلال الأنابيب يكون كبيراً جداً في الغالب، وفرق الضغط بين فتحة دخوله وفتحة خروجه هو في أغلب الأحيان فقط جزء من الضغط الجوي. للسماح للهواء بالتحرك بسرعة خلال الأنابيب فإن أقطارها يجب أن تكون كبيرة.

٣. عند سطح الملعقة.

لماذا: يجب أن يكون ضغط تيار الماء أعلى في الجزء الخارجي للانعطاف - أي عند سطح الملعقة - من قيمته عند الجزء الداخلي للانعطاف.

٤. حتى عند الضغط الجوي، فإن الهواء له طاقة ضغط كامنة. حينما يتسارع الهواء باتجاه الضغط الأكثر انخفاضاً في المكنسة، فإن الهواء يحوّل بعضا من تلك الطاقة الضغطية الكامنة لطاقة حركية.

لماذا: تستخدم المكانس الكهربائية فوهات لجعل الهواء يتحرك بسرعة عالية. يسحب الهواء السريع الحركة والمتدفق لداخل المكنسة الكهربائية الغبار معه لتنظيف منزلك.

٥. يصبح الهواء المتدفق خلال «الأودية» الناشئة من المباني اضطرابيا ويشكل دوامات تقوم على تدوير أوراق الشجر وقطع الورق.

لماذا: سواء تحرك جسم خلال مائع أو مائع مارا بجسم، فإن عدد رينولدز يرتبط بالحالة. عندما يصبح عدد رينولدز كبيرا بما فيه الكفاية بحيث أن اللزوجة لا تستطيع إبقاء المائع متدفقا بشكل منتظم، فإن الاضطراب يظهر. عند هبوب الرياح خلال المدن الكبيرة، فإن الاضطراب ودواماته الدائرية تكون موجودة في كل مكان.

٦-٢ الكرات والهواء

١. تدفق الماء البطيء حول الصخرة هو تدفق طبقي، لذا فإن ضغطه يكون أكبر ما يمكن عند مقدمة ومؤخرة الصخرة. الضغط المتزايد خلف الصخرة يرفع مستوى الماء هناك.

لماذا: يميل التدفق الطبقي حول عائق لأن ينشئ مناطق ضغط مرتفع عند مقدمة ومؤخرة العائق، ومناطق ضغط منخفض في الجوانب. في هذه الحالة، تظهر الاختلافات في الضغط كتغيرات في مستوى الماء. عند مقدمة ومؤخرة الصخرة، فإن الضغوط المرتفعة نسبيا تدفع مستوى الماء للأعلى بينما على جوانب الصخرة يهبط مستوى الماء.

٢. يواجه قارب الكانو البطيء الحركة تدفقا طبقيا في الماء بينما يواجه الكانو السريع الحركة تدفقا اضطرابيا.

لماذا: إذا كانت سرعة قارب الكانو أقل من 1cm/s تقريبا، فإن عدد رينولدز له سيكون أقل من 2000 وسيكون الماء المتدفق حوله طبقيا. سوف يمر الماء بسلاسة حول جوانب قارب الكانو ويجتمع سوية مرة أخرى خلفه. ولكن عندما يتحرك قارب الكانو بسرعة مرتفعة كافية بحيث يتجاوز عدد رينولدز له 2000، فإن تدفق الماء يصبح اضطرابيا ويترك القارب خلفه أثرا زبديا. ينتج هذا الأثر الاضطرابي مقاومة ضغطية على القارب وينتزع طاقة منه. أي شخص سبق له تجديف قارب الكانو يعرف أن التغلب على هذه المقاومة الضغطية يمكن أن يكون منهكا.

٣. عند أبعد نقطة ممكنة في مؤخرة السيارة.

لماذا: كما هو الحال مع جميع الأجسام الكبيرة والسريعة الحركة في الهواء، فإن المقاومة الضغطية هي المصدر الرئيسي لمقاومة الهواء. أنت تريد أن تقلل هذه المقاومة بإبقاء الهواء متدفقا بسلاسة فوق السيارة إلى أن يغادر مؤخرتها بأثر اضطرابي صغير. كلما كان التجويف الهوائي خلف السيارة أصغر، كان ذلك أفضل. السيارات المنتجة بتصميم ديناميكي هوائي تترك أثرا اضطرابيا يقدر فقط بحوالي

ثلث مساحة مقطع أسمك منطقة في السيارة. مع أن هناك مجالاً لتحسين ذلك، إلا أن هذه السيارات تواجه مقاومة أقل بكثير من السيارات القديمة المكعبة الشكل.

٤. قوة الرفع تتجه للأسفل، لذا فإن الكرة تتسارع للأسفل بشكل أسرع مما لو كانت بفعل الجاذبية فقط.

لماذا: الكرة التي تدور قمتها تسقط بسرعة أكبر من تلك التي تسقط دون دوران. في لعبة التنس، تظهر ضربة كرة بدوران القمة وكأنها تغوص للأسفل بمجرد أن تجتاز الشبكة. معنى انحراف الكرة للأسفل أنها يمكنها التحرك بسرعة كبيرة وتظل داخل الملعب وبالتالي يكون صعباً جدا التصدي لها.

٦-٣ الطائرات

١. يؤخر السطح الانسيابي انفصال تدفق الهواء حول الدراجة وبالتالي يخفض من المقاومة الضغطية.

لماذا: بدون سطح انسيابي، فإنه يجب على المتسابق بالدراجة أن يكافح ضد مقاومة ضغطية عالية. إن الارتفاع الحاد في التدرج الضغطي والذي يتتبع الأجزاء العريضة لجسم المتسابق يُحدث انفصالاً في التدفق ويُنشئ المتسابق أثرا اضطرابيا هائلا. يجعل السطح الانسيابي المركبة انسيابية: فالارتفاع اللطيف في التدرج الضغطي المتتبع لأعرض جزء فيها لا يُحدث انفصالاً في التدفق.

٢. الهواء المتحرك حول السطح الخارجي للشراع له ضغط أقل من ضغط الهواء المتحرك عبر السطح الداخلي للشراع. يواجه الشراع قوة رفع تدفعه والقارب عبر الماء.

لماذا: يواجه الشراع كلا من قوى رفع ومقاومة. يواجه الشراع قوة ديناميكا هوائية تدفعه للخارج (دفع) وباتجاه الرياح قليلاً (مقاومة) تماما مثل جناح الطائرة في مواجهته لقوة ديناميكا هوائية للأعلى (رفع) وباتجاه تيار الهواء قليلاً (مقاومة). عارضة القارب الشراعي ودفته توفر قوى إضافية بحيث يمكن التحكم بمحصلة القوة على القارب الشراعي ويمكنه السير في اتجاهات مختلفة.

٣. تتعطل أجنحة الطائرة.

لماذا: إن إمالة مقدمة الطائرة للأعلى تزيد من زاوية مواجهتها. مع أن هذا العمل يزيد من الرفع للأعلى لحد ما، إلا أنه يمكنه أيضا أن يتسبب في انفصال تدفق الهواء من السطح العلوي للجناح. الانخفاض المفاجئ في قوة الرفع والزيادة في المقاومة والتي تصاحب التعطل يمكن أن تتسبب في سقوط الطائرة. التعطل أثناء الإقلاع أو الهبوط خطر جدا.

٤. يواجه الجانب الخلفي لكل ريشة في المروحة ضغط الهواء الأقل.

لماذا: الهواء الذي يهب باتجاهك من المروحة المنزلية مثل الهواء الذي يهب للخلف من مروحة الطائرة. الضغوط الأكثر انخفاضاً التي تواجهها مروحة الطائرة هي على أسطحها الأمامية. بنفس الطريقة، الضغوط الأكثر انخفاضاً التي تواجهها المروحة المنزلية هي عند أسطحها الخلفية. عدم التوازن في الضغط يدفع المروحة المنزلية بعيدا عنك بينما تدفع المروحة الهواء باتجاهك.

٥. حينما يتم تبطئة الهواء، فإن ضغطه يزداد. الطاقة الكلية للهواء تظل ثابتة.

لماذا: النتيجة الرائعة لتأثير برنولي هي أنه يمكنك تبطئة الهواء دون تبذير طاقته الحركية. تلك الطاقة تصبح طاقة ضغط كامنة، ويمر الهواء خلال المحرك النفاث بهذا الشكل. حينما يغادر الهواء المحرك النفاث، فإن طاقة ضغطه الكامنة تصبح طاقة حركية مرة أخرى، بحيث لا يتم هدر أي طاقة.

دقق في أرقامك – الإجابات

٦-١ سقاية الحديقة

١. حوالي 0.20L/s.

لماذا: تدفق الماء في الأنابيب يتّبع قانون بوازيل (معادلة ٦,١,١) ويتناسب مع الأس الرابع لقطر الأنبوب. إن تقليص القطر بمقدار 20 ٪، أي بمقدار 0.8، مع إبقاء طول الأنبوب والضغوط واللزوجة دون أي تغيّر، سيخفض معدل حجم التدفق بنسبة 0.84 أو 0.41. توصّل الأنابيب الآن حوالي 0.2L/s (حاصل ضرب 0.5L/s في 0.41). من الواضح أنه لا يحتاج لترسب كبير للمعادن لتقليل التدفق خلال الأنبوب.

٢. اضطرابي.

لماذا: لحساب عدد رينولدز لتدفق الهواء حول السيارة، تحتاج لمعرفة لزوجة الهواء من الجدول ٦,١,١ (0.0000183Pa·s أو 0.0000183kg/m·s)، وكثافة الهواء من القسم ٤-١ ($1.25kg/m^3$)، وطول السيارة (حوالي 3m)، وسرعتها خلال الهواء (تقريبا 55mph أو 25m/s). عندها يمكنك حساب عدد رينولدز الخاص بها التقريبي، باستخدام معادلة ٦,١,٢:

$$\text{عدد رينولدز} = \frac{1.25kg/m^3 \cdot 3m \cdot 25m/s}{0.0000183kg/m.s} = 5.1 \text{ مليون}$$

عدد رينولدز للسيارة أكبر بكثير من حد بداية الاضطراب (2300)، لذا فإن الهواء يصبح كالدوامة الفوضوية حول السيارة. هذا يفسر لماذا يطير شعرك بشكل هائج.

تمارين:

١. من المزاح المألوف في السكن الداخلي في الكليات القيام بسحب عدد من السيفون في دورات المياه بينما يوجد شخص ما في المروش. ينخفض ضغط الماء البارد في المروش ويصبح الماء في المروش ساخنا جدا. لماذا ينخفض ضغط الماء البارد فجأة؟

٢. في الأيام الحارة في المدينة، يقوم الناس في بعض الأحيان بفتح حنفيات مكافحة الحريق واللعب بالماء. لماذا يخفض هذا العمل ضغط الماء في حنفيات مكافحة الحريق القريبة؟

٣. لماذا يتسبب الضيق البسيط في الشرايين التاجية، وهي الأوعية الدموية التي تمد القلب بالدم، في انخفاض كبير في كمية الدم المتدفق خلالها؟

٤. لماذا تنسكب الشيرة الساخنة بسهولة أكثر من الشيرة الباردة؟

٥. لماذا يكون دبس السكر في شهر يناير أبطأ من دبس السكر في شهر يوليو، على الأقل في نصف الكرة الأرضية الشمالي؟

٦. لماذا يصعب ضغط صلصة الكاتشب من ثقب صغير جدا في كيسها؟

٧. يقوم خبّاز بتزيين كعك بضغط الكريمة وإخراجها من مخروط ورقي محكم الغلق مقصوص طرفه. إذا جعل الخبّاز الفتحة في المخروط صغيرة جدا، فإنه من الصعب جعل الكريمة تتدفق منها. لماذا؟

٨. لماذا تكون الرياح أشد عدة أمتار فوق حقل مستوٍ مقارنة بشدتها فوق مستوى الأرض مباشرة؟

٩. المشاة الذين على سطح جسر متأثر بالرياح لا يشعرون بشدة الرياح الكاملة لأن الهواء بالقرب من سطح الجسر يتحرك ببطء نسبيا. فسر هذا التأثير من خلال الطبقة الحدّية.

١٠. يتحكم صمام كهربائي بالماء في رشاشات الماء بحديقتك. لماذا تهتز الأنابيب في منزلك كلما يوقف هذا الصمام الماء فجأة ولكن لا تهتز عندما يطلق هذا الصمام الماء فجأة؟

١١. إذا أسقطت علبة مليئة بصلصة التفاح واصطدمت بأرضية من الإسمنت مباشرة بقاعها المستوي، ماذا يحدث للضغط في قمة وقاع العلبة؟

١٢. عندما تخلط الحليب أوالسكر مع قهوتك، فإنك يجب أن تحرك الملعقة بسرعة كافية لإنتاج تدفق اضطرابي حول الملعقة. لماذا يساعد هذا الاضطراب في الخلط؟

١٣. إذا بدأت تحريك زورقين ورقيين متماثلين من نفس النقطة، فإنه يمكنك أن تجعلهما يتبعان نفس المسار على ساقية هادئة. لماذا لا يمكنك القيام بنفس الشيء في جدول يحتوي على دوامات وتيارات دائرية؟

١٤. عندما تأرجح عصا ببطء خلال الهواء، لا تسمع صوتاً. لكن عندما تأرجحها بسرعة، فإنك تسمع صوت «ووش». أي سلوك للهواء يُنشئ هذا الصوت؟

١٥. إذا حاولت ملء دلو بإمساكه تحت شلال، ستجد أن الدلو يُدفع للأسفل بقوة هائلة. كيف يمكن للماء الساقط أن يبذل مثل هذه القوة العظيمة باتجاه الأسفل على الدلو؟

١٦. في بعض الأحيان ترى ورقاً مضغوطاً بإحكام على مقدمة سيارة متحركة. ما الذي يُمسك بالورقة في مكانها؟

١٧. كثيراً ما يسبح السمك في ساقية ضد التيار أو مع التيار قريباً من دعامات جسر. قارن بين سرعة الماء في هذه المناطق مع سرعته في منطقة الساقية الواسعة وعند جانبي الدعامات؟

١٨. لماذا يكون لمضربة الذباب العديد من الثقوب؟

١٩. لديك كرتا غولف تختلف فقط في أسطحها. إحدى الكرتين لها نقرات بينما الأخرى ملساء. إذا أسقطت هاتين الكرتين آنيا من برج طويل، أيهما ستصطدم بالأرض أولا؟

٢٠. إذا ركبت دراجتك خلف شاحنة كبيرة مباشرة، ستجد أنك لا تحتاج تحريك الدواسات بقوة للاستمرار بالتحرك للأمام. لماذا؟

٢١. كيف يمكن للركض مباشرة خلف عدّاء آخر أن يخفض مقاومة الرياح التي تواجهها؟

٢٢. عندما تكون السيارة واقفة فإن هوائي الراديو المرن فيها يشير رأسيا للأعلى. لكن عندما تتحرك السيارة بسرعة في طريق سريع، فإن الهوائي يتقوس باتجاه مؤخرة السيارة. ما هي القوة التي تحني الهوائي؟

٢٣. لكي تسير في طريق مستوٍ بسرعة ثابتة، فإنه يجب أن يعمل محرك سيارتك ويجب على الاحتكاك مع الأرض أن يدفع السيارة للأمام. بما أن محصلة القوة على جسم يسير بسرعة ثابتة هي صفر، فلماذا تحتاج لهذه القوة الدافعة للأمام من الأرض؟

٢٤. كثيراً ما يكون لدراجات السباق أغطية على شكل أقراص فوق الأسلاك التي في عجلتها. لماذا تُعد هذه الأسلاك النحيفة مشكلة للدراجات التي تسير بسرعة؟

٢٥. تتباطأ الرصاصة بسرعة كبيرة في الماء على عكس الرمح. ما هي القوة التي تقوم بتبطئة هذين الجسمين، ولماذا يأخذ الرمح وقتاً أطول للتوقف؟

٢٦. إذا علقت كرة تنس بخيط، فإنها سوف تنحرف باتجاه الرياح عند هبوب ريح قوية. لكن إذا قمت بتبليل الكرة بحيث يتسطح الزغب الذي على سطحها، فإنها سوف تنحرف أكثر من السابق. لماذا يزيد تمليس الكرة من انـحرافها؟

٢٧. فسّر لماذا تبطئ مظلة الهبوط (الباراشوت) من هبوطك عندما تقفز من طائرة.

٢٨. في بعض الأحيان يلبس متسابقو الدراجات خوذات على شكل دمعة والتي تستدق خلف رؤوسهم. لماذا يقلل وجود هذا الجزء المستدق الأملس خلفهم من قوى المقاومة التي يواجهونها بالنسبة لما سيواجهونها بلبس خوذات على شكل كرة؟

٢٩. إذا أردت أن تواجه الأنابيب المعدنية في دراجتك أقل مقاومة ممكنة حينما

تتسابق بها، فهل الأنابيب الاسطوانية الشكل هي الأفضل؟ كيف يجب أن يكون شكلها؟

٣٠. في عام ١٩٧١، ضرب رائد الفضاء ألن شيبارد كرة غولف على سطح القمر. كيف أثر عدم وجود هواء على تحليق الكرة؟

٣١. يتزحلق متزلج مائي على سطح الماء في بحيرة. ما هي أنواع القوى التي يبذلها الماء على المتزلج، وما هو تأثير هذه القوى؟

٣٢. كيف سيحلق القرص الطائر الفريزبي (frisbee) على القمر الخالي من الهواء؟

٣٣. يمكنك شراء قاعدات خاصة لكرة الغولف والتي تلتف خلف الكرة لمنعك من إعطائها أي دوران عند ضربها. هذه القاعدات تضمن عدم حدوث انحرافات في مسار الكرة. لكن كيف تؤثر هذه القاعدات على المسافة التي تقطعها الكرة؟ ولماذا؟

٣٤. يمكن لإعصار أو قوة الريح العاصفة أن ترفع سقف منزل، حتى لو لم يكن للسقف حواف بارزة. كيف يمكن لهبوب الرياح عبر السقف أن تنتج قوة للأعلى عليه؟

٣٥. يمكن للاعب كرة الطائرة المحترف أن يرسل الكرة دون أن تلتف على نفسها إطلاقا. ترتد الكرة بلطف من جانب لجانب حينما تطير من فوق الشبكة ومن الصعب إعادتها. ما الذي يتسبب في تسارع الكرة نحو الجوانب؟

٣٦. لماذا يكون للطائرة «سقف تحليق»، أي أقصى ارتفاع والذي فوقه لا يمكن للطائرة أن تحصل على قوة رفع كافية لموازنة قوة الجذب للأسفل؟

٣٧. إذا تركت تيار الماء من الصنبور يتدفق بسرعة فوق الجزء المنحني من قاع ملعقة، فإن الملعقة سوف تنجذب نحو التيار. فسّر هذا التأثير.

٣٨. إذا مددت يدك خارج نافذة سيارة متحركة، بحيث يشير كف يدك مباشرة للأمام، فإن القوة المؤثرة على يدك تكون مباشرة للخلف. فسّر لماذا لا ينتج نصفا التيار الهوائي اللذَين يمران فوق وتحت يدك قوة إجمالية للأعلى أو للأسفل على يدك.

٣٩. إذا أملت كفك للأسفل قليلاً، بدلا من وضع كف يدك مشيراً للأمام (انظر تمرين ٣٨)، فإن القوة التي على يدك ستكون للخلف وللأعلى. كيف يمكن لتيار الهواء أن يبذل قوة للأعلى على يدك؟

٤٠. عندما يحوم طائر طنّان أمام زهرة، ما هي القوى التي تؤثر عليه وما هي محصلة القوة التي يواجهها؟

٤١. تتعطل مروحة منزلية رديئة التصميم، مما يجعلها قليلة الكفاءة في تحريك الهواء. صف تدفق الهواء خلال المروحة عندما تتعطل ريشها.

٤٢. عندما تبدأ طائرة بهبوط حاد، فإن الهواء يتدفق باتجاهها من الأسفل. إذا قام قائد الطائرة برفعها فجأة من هذا النوع من الهبوط، فإن أجنحتها قد تتعطل فجأة، على الرغم من أن الطائرة متجهة أفقيا. فسّر لماذا تتعطل الأجنحة.

مسائل

١. ما هي السرعة تقريباً التي يمكن أن تسبح بها سمكة قبل أن تواجه تدفقا اضطرابيا حول جسمها؟

٢. ما مقدار الزيادة في ارتفاع ضغط الدم الذي يجب أن يكون عليه ضغط دمك لتعويض ضيق في أوعيتك الدموية مقداره 5 %؟ (الفرق في الضغط عبر أوعيتك الدموية هو في الحقيقة مساوٍ لضغط دمك.)

٣. إذا استبدل شخص ما الماء الموجود في أنابيب منزلك بزيت زيتون، فكم الزيادة في الوقت الذي ستستغرقه لملء حوض الحمام؟

٤. تحاول أن تجدّف قارب الكانو بهدوء عبر بحيرة ساكنة وأنت تعرف أن الاضطراب يُحدث صوتا. ما هي السرعة التي يمكن لقارب الكانو والمجداف أن يتحركا بها في الماء دون إحداث اضطراب؟

٥. الأنابيب المؤدية للمِرَشّات في غرفة تغيير ملابسك قديمة وغير جيدة. في حين ضغط الماء في المدينة هو 700,000Pa، فإن الضغط في غرفة تغيير الملابس عند فتح مرشة واحدة هو فقط 600,000Pa. استخدم معادلة (٦،١،١) لحساب الضغط التقريبي عند فتح ثلاث مرشات.

٦. إذا حملتْ أنابيب سكنك الداخلي عسلاً بدلا من الماء، فإن ملء كوب لتفريش أسنانك قد يستغرق وقتا طويلا. إذا أخذ الصنبور 5 ثوانٍ لملء كوب بالماء، فما هو الوقت الذي سيأخذه لملء كوبك بالعسل، على فرض أن الضغوط والأنابيب ظلت دون أي تغيير؟

٧. ما هي السرعة التي تحتاج أن تحرك بها عصا قطرها 1 cm خلال زيت زيتون لتصل لعدد رينولدز مقداره 2000، بحيث تبدأ برؤية اضطراب حول العصا؟ (زيت الزيتون له كثافة مقدارها $918kg/m^3$)

٨. طول العائق الأكثر تأثيرا في المنطاد هو عرضه – أي المسافة التي تفصل الهواء حينما يتدفق حول المنطاد. ما مقدار السرعة المنخفضة التي يجب أن يتحرك بها منطاد عرضه 15m لإبقاء تدفق الهواء حوله طبقيا؟ (للهواء كثافة مقدارها $1.25\ kg/m^3$)

الفصل ٧

الحرارة وتحولات الطور

لا يمكننا أن نرى كل الحركة التي تحدث حولنا. بعض هذه الحركة مخفية في أعماق كل جسم، حيث تُبقي الطاقة الحرارية الذرات والجزيئات متذبذبة ذهابا وإيابا في نشاط اضطرابي لا نهائي. نحن ندرك هذه الطاقة الحرارية في أغلب الأحيان لمجرد أنها تحدد درجة حرارة الجسم؛ كلما احتوى جسم على طاقة حرارية، زادت درجة حرارته وزاد الشعور بسخونته.

ولكن الطاقة الحرارية تلعب دورا مهما في حياتنا اليومية. بالإضافة للتحرك من مكان لآخر، فإن الطاقة الحرارية يمكنها تحويل مادة ما من الحالة الصلبة إلى السائلة إلى الغازية. في الحقيقة ما تشعر به عندما تلمس جسما ساخنا هو تدفق طاقته الحرارية لداخل يدك الأبرد ورفع درجة حرارة جلدك. عندما تتدفق الطاقة الحرارية بهذا الشكل، من جسم أسخن إلى جسم أبرد، فإننا نسمي ذلك حرارة. في هذا الفصل، سوف نفحص درجة الحرارة، والحرارة، وأطوار المادة لكي نفهم عالمنا الساخن والبارد أكثر.

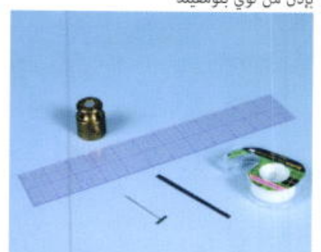
تجربة: ترمومتر المسطرة

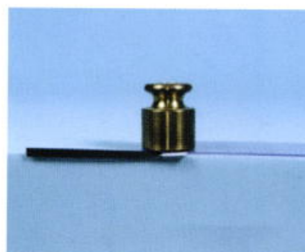
أحد التأثيرات التي يُحدثها تغير في درجة الحرارة على جسم عادي هو تغيير حجمه. مع أن هذا التغير في الحجم صغير جدا ومن السهل عدم ملاحظته، فإنه يمكنك استخدام الفائدة الميكانيكية لجعله مرئيا أكثر. هذه طريقة لصنع ترمومتر بدلالة تغير الحجم باستخدام فقط مسطرة من البلاستيك الشفاف، ودبوس، وثقل صغير، وقطعة من الورق المقوّى وبعض من الشريط اللاصق.

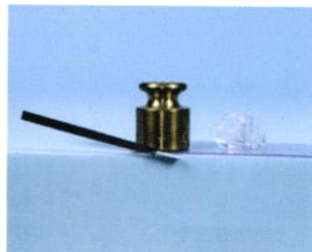
ضع المسطرة البلاستيكية على طول حافة منضدة وألصق أحد طرفيها بإحكام على الطاولة. اقطع شريطاً رفيعاً من الورق المقوّى، حوالي 3mm عرضا (0.1in) و15cm طولا (6in)، واضغط الدبوس بعناية خلال أحد طرفي الشريط. استخدم قليلاً من الشريط اللاصق للصق رأس الدبوس بالورقة. عندما تنتهي من ذلك، فإن الشريط الورقي يجب أن يكون متصلا بإحكام بالدبوس بحيث عندما يدور الدبوس يدور معه الشريط. هذا الشريط هو مؤشر ترمومترك.

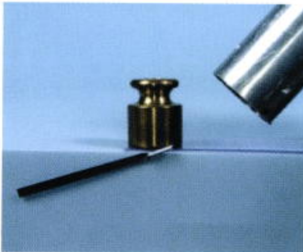
الآن مرّر الدبوس تحت الطرف الحرّ للمسطرة وضع الوزن الصغير فوقه. يقوم الوزن بدفع المسطرة والدبوس على بعضهما بحيث يتعرضان للكثير من الاحتكاك السكوني. بهذه الطريقة، عندما يتحرك الطرف الحر للمسطرة لليسار أو اليمين، فإن الدبوس سيدور ويدير معه المؤشر.

بإذن من لوي بلومفيلد







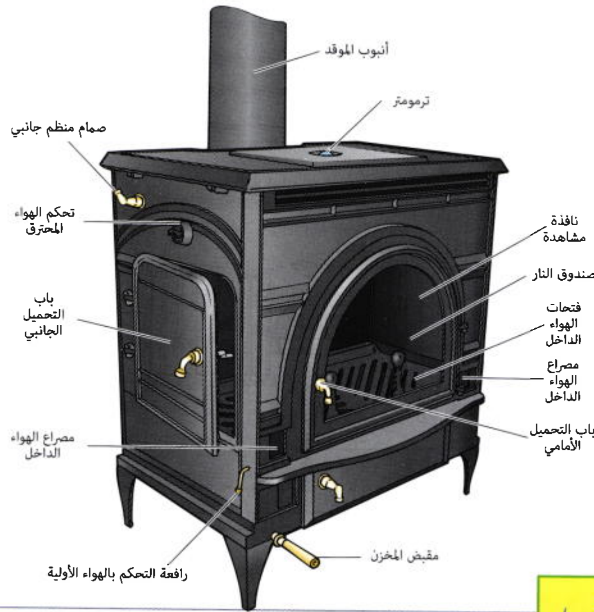


ترمومترك الآن كامل. إذا أدرت الدبوس والمؤشر بعناية بيدك لكي يكون المؤشر أفقيا، فتستطيع أن «تقرأ» الترمومتر من خلال الزاوية التي يحدثها المؤشر بالنسبة لسطح الطاولة. إذا سخّنت المسطرة البلاستيكية بتسليط نفَسك عليها، أو بوضع يديك عليها، أو بتسخينها بلطف بواسطة مجفف الشعر، فإن المسطرة ستصبح أطول. سيتحرك طرفها الحر بعيدا عن الطرف المثبّت وسيتسبب في دوران الدبوس. سوف ترى تغيرا طفيفا في اتجاه المؤشر حينما يوضح ترمومترك درجة حرارته الجديدة.
تنبأ ماذا سيحدث إذا لم تسخن المسطرة كلها بشكل منتظم ثم لاحظ ماذا سيحدث. حاول أن تقيس تأثير التسخين غير المنتظم. هل تحققت من تنبئك؟

يمكنك أيضا أن تجعل المؤشر يدور في الاتجاه الآخر بتبريد المسطرة. إن وضع بضعة مكعبات من الجليد على المسطرة سيتسبب في انكماشها وسينحرف المؤشر في الاتجاه المعاكس.

دليل الفصل

في هذا الفصل، سوف نفحص الطاقة الحرارية، ودرجة الحرارة، والحرارة ضمن سياق ثلاثة أنواع مألوفة من الأجسام: (١) مواقد الخشب، و(٢) الماء، والبخار، والجليد، و(٣) المصابيح المتوهجة. في قسم مواقد الخشب، سننظر في كيفية إنتاج الطاقة الحرارية وفي الوسائل الثلاثة الرئيسية التي تنتقل بها الطاقة الحرارية على شكل حرارة من الأجسام الأسخن إلى الأبرد: التوصيل، والحمل، والإشعاع. في قسم الماء والبخار والجليد، سنرى تأثيرات الحرارة ودرجة الحرارة على أطوار الماء الثلاثة وكيف تحدث التحويلات بين هذه الأطوار. في قسم المصابيح المتوهجة، سندرس انتقال الحرارة بالإشعاع لنرى أنه يمكنه أن يتضمن إشعاع الضوء المرئي. للحصول على عرض أكثر تفصيلا للفصل، انظر قدما في ملخص الفصل في صفحة ٢٢٦.



٧-١ مواقد الخشب

إن فصل الشتاء سيكون كريهاً لمعظمنا إذ لم تكن توجد تدفئة. إن التدفئة تبقي حجراتنا دافئة حتى وإن كان الطقس باردا في الخارج. إحدى الطرق الدارجة للتدفئة هي استخدام موقد الخشب، والذي يحرق جذوع الأشجار في صندوق الاحتراق ويبعث طاقة حرارية في الحجرة. في هذا القسم سوف نرى كيف ينتج موقد الخشب طاقة حرارية وكيف تتدفق هذه الطاقة الحرارية خارج الموقد لإبقائنا دافئين.

أسئلة للتفكير

ماذا يحدث للطاقة الكيميائية الكامنة في جذع شجرة عندما تقوم بحرقه؟ لماذا تُحرق عندما تلمس جسما ساخنا؟ لماذا تشعر يدك بسخونة أكثر عندما تضعها فوق سطح ساخن مما لو وضعتها بجانب ذلك السطح؟ لماذا يشعر جلدك بسخونة عندما تواجه نارا، حتى لو كان الهواء حولها باردا؟ لماذا يستغرق تسخين جسم بارد وقتاً؟

تجارب يمكن القيام بها

تنتج شمعة محترقة طاقة حرارية، فتوفر كلا من الضوء والدفء لحجرة صغيرة. لكن من أين تأتي هذه الطاقة الحرارية وكيف تتدفق في محيطها؟

أضئ شمعة قصيرة وانظر أولا في كيفية إطلاقها للطاقة الحرارية. يستهلك اللهب الشمع ببطء لكنه يحتاج أيضا للهواء. غطّ الشمعة بكوب طويل لا يمكن أن يلامسه اللهب أو يتلفه. يجب أن يمنع الزجاج هواء الغرفة من الوصول للشمعة. كيف تؤثر البيئة الجديدة المحكمة الغلق على لهب الشمعة؟ حاول أن تفسر هذه النتيجة.

أوقد الشمعة مرة ثانية وفكّر في الطرق التي تتدفق بها الحرارة من اللهب إليك. مرّر يدك بعناية فوق اللهب، مع إبقائها على مسافة آمنة فوقه لتجنب إحراق نفسك. لماذا يدفئ اللهب جلدك بسرعة عندما تكون يدك فوقه مباشرة؟ والآن ضع يدك بجانب اللهب على بعد مسافة آمنة. يجب أن تشعر مرة أخرى بالدفء من اللهب. كيف تتدفق الحرارة من اللهب إلى يدك الآن؟

خذ قلم رصاص خشبياً وامسك به على بُعد بضعة سنتيمترات فوق اللهب لفترة لا تزيد عن ثانيتين. ثم المس سطح قلم الرصاص بأصابعك. يجب أن يُدفئ أصابعك. كيف تتدفق الحرارة من قلم الرصاص ليدك في هذه الحالة؟ لماذا سيكون خطأ مؤلماً أن تقوم بهذه التجربة بقلم رصاص معدني؟ لماذا فقط ثانيتين؟

جذع شجرة محترق: الطاقة الحرارية

بإذن من مؤسسة ترافس اندستريس



شكل ١,١,٧: موقد الخشب الموضح بالشكل ينقل الحرارة للحجرة بالتوصيل من خلال جدرانه المعدنية، وبحمل الهواء المار بأسطحه، وبالإشعاع من سطحه الخارجي الأسود.

ينتج موقد الخشب طاقة حرارية ويوزعها كحرارة للحجرة المحيطة (شكل ١,١,٧). لقد تعرضنا سابقا للطاقة الحرارية: في انزلاق خزانة الملفات على الرصيف، وفي ارتداد كرة قديمة بكفاءة ردية من على الأرض، وفي العسل المنسكب ببطء من القنينة. في كل من هذه الحالات، أصبحت الطاقة المنتظمة - أي الطاقة التي يمكن استخدامها بسهولة لبذل شغل - طاقة حرارية غير منتظمة وازدادت درجة حرارة الأجسام. لكن بما أننا الآن سوف نقوم بدراسة آلات التسخين ذاتها، فدعنا نعيد فحص الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة لنرى كيف تتحرك الطاقة الحرارية من جسم لآخر.

عندما تحرق جذع شجرة في المدفئة أو موقد الخشب، فأنت تحوّل طاقة الجذع الكيميائية الكامنة المنتظمة إلى طاقة حرارية. إن الطاقة الحرارية هي شكل غير منتظم للطاقة ومحفوظ في الطاقات الحركية والكامنة للذرات والجزيئات الفردية. إن وجود الطاقة الحرارية في جذع الشجرة، أو موقد الخشب، أو في هواء الحجرة هو الذي يعطيهم درجة حرارة؛ كلما كان للجسم طاقة حرارية زادت درجة حرارته.

تعتمد طبيعة الطاقة الحرارية نوعا ما على الشيء التي هي بداخله. في جذع الشجرة المحترق والساخن، فإن الطاقة الحرارية في الغالب موجودة في ذرات الخشب وجزيئاته، والتي تتذبذب ذهابا وإيابا بسرعة بالنسبة لبعضهم البعض. عندما تتحرك كل من هذه الجسيمات، فإن له طاقة حركية. وعندما يدفع أو يسحب الجسيم المجاور، فإن له طاقة كامنة.

في الهواء القريب من الجذع المحترق، تكون الطاقة الحرارية موجودة مرة أخرى غالباً في الذرات والجزيئات. لكن بما أن هذه الجسيمات في الأساس حرة ومستقلة، فإن معظم هذه الطاقة الحرارية هي طاقة حركية. تخزّن جسيمات الهواء طاقة كامنة فقط أثناء اللحظات القصيرة عندما تصطدم ببعضها البعض.
وفي مذكي النار المعدني والذي تستخدمه لتحريك النار، فإن الطاقة الحرارية ليست فقط في الذرات والجزيئات، بل أيضا في الإلكترونات المتنقلة والتي تتحرك في المعدن وتسمح له بتوصيل الكهرباء.

بالرغم من أن معرفة ما هي الطاقة الحرارية مهمة، إلا أنه مهم أيضا معرفة ما هو ليس بطاقة حرارية. تتضمن الطاقة الحرارية لجذع الشجرة فقط طاقته الداخلية غير المنتظمة وليس الطاقة المرتبطة بجذع الشجرة ككل. إن تحريك الجذع بمذكي النار لزيادة طاقته الحركية، ورفعه بالملقط لزيادة طاقة الجاذبية الكامنة له، وثنيه بجذع آخر لزيادة طاقته المرنة الكامنة، كل ذلك يزيد من طاقته ككل وليس طاقته الحرارية.

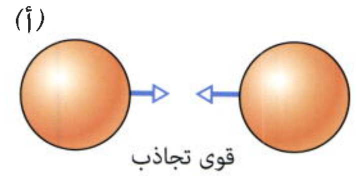
تحقق من فهمك # ١: ضربة تسخين (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

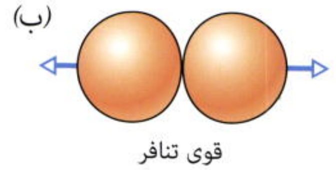
إذا أسقطت كرة، هل ستزيد طاقتها الحرارية أثناء سقوطها؟ (أهمل مقاومة الهواء)

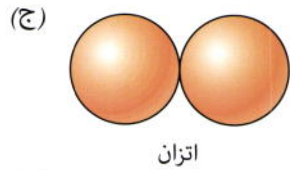
القوى بين الذرات: الروابط الكيميائية

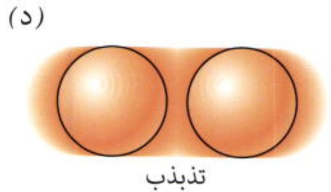
لفهم كيف ينتج جذع الشجرة المحترق طاقة حرارية، دعنا نلقي نظرة على الروابط بين الذرات والطاقة الكيميائية الكامنة المختزنة في تلك الروابط. بما أن كليهما ينتجان من القوى بين الذرات، فإننا من هذه النقطة سنبدأ.

حينما تجلب ذرتين بالقرب من بعضهما، فإنهما تبذلان قوى جذب على بعضهما (شكل ٢,١,٧ أ). هذه القوى الكيميائية هي قوى كهرومغناطيسية في الأصل وتزداد قوتها كلما اقتربتا. لكن هذا التجاذب يتلاشى عندما









شكل ٢,١,٧ (أ) تتجاذب ذرتان لبعضهما عند مسافات معتدلة لكن (ب) تتنافران عندما تصبحان قريبتين جدا من بعضهما. (ج) بين هاتين الحالتين بُعد اتزانهما، والذي عنده لا تتجاذب الذرتان ولا تتنافر وبالتالي هما في حالة اتزان. (د) تميل أزواج الذرات التي لها طاقة إضافية للتذبذب حول بُعد اتزانهما.

تبدأ الذرات بالتلامس ويُستبدل في النهاية بتنافر عندما تصبح الذرات قريبة جدا (شكل ٢,١,٧ ب). إن المسافة التي تفصل بين الذرات والتي ينتهي عندها التجاذب ويبدأ التنافر هي بُعد الاتزان، أي بُعد الانفصال الذي لا تبذل عنده الذرتان أي قوى على بعضهما (شكل ٢,١,٧ ج). بما أن الذرات صغيرة جدا، فإن بعد الاتزان صغير جدا أيضا، في العادة فقط حوالي جزء من عشر بليون من المتر.

تخيّل إمساك ذرتين بملقط وجلبهم ببطء قريباً من بعض. كلتاهما تنجذب باتجاه الأخرى أثناء اقترابهما من بعضهما البعض، فتبذلان شغلاً عليك وتزيدان من طاقتك. بما أن الطاقة محفوظة، فإنه لا بد أن طاقتهما تتناقص. إنهما تتخليان عن الطاقة الكيميائية الكامنة – أي الطاقة المختزنة في القوى الكيميائية بين الذرات.

بمجرد أن تصل الذرات لبُعد اتزانهما، فإنه يمكنك تركهما ولن تبتعدان عن بعضهما. مثل كرتين متصلتين ببعضهما بزنبرك، فإن الذرات في حالة اتزان مستقر. بما أنهما تخليا عن بعض من طاقتهما الكيميائية الكامنة، فإنهما لا يمكنهما الانفصال ما لم تعد لهما تلك الطاقة. إن إبعاد الذرتين عن بعضهما يتطلب بذل شغل، فالذرات تبقى مرتبطة بواسطة رابطة كيميائية.

أصبحت الذرات المرتبطة جزيئاً. قوة رابطة الذرات تساوي مقدار الشغل الذي بذلته الذرات عندما جُلبت سوية أو بشكل مكافئ، الشغل المطلوب لفصلها. تتراوح قوى الروابط من أقصى قوة في حالة ذرتي نيتروجين لأقصى ضعف في حالة ذرتي نيون.

إذا كان لدى الذرات طاقة قليلة إضافية، فإن الذرات المترابطة يمكنها أن تتذبذب ذهابا وإيابا حول بُعد اتزانها (شكل ٢,١,٧ د). كلما تتحرك الذرات بسرعة باتجاه بعضهما أو بعيدا عن بعضهما، فإن معظم طاقتها هي طاقة حركية. كلما تتباطأ الذرات لترتد، فإن معظم طاقتها هي طاقة كيميائية كامنة. إجمالا، تظل طاقة الجزيء الكلية ثابتة، ويتذبذب ذهابا وإيابا إلى أن ينقل طاقته الإضافية لمكان آخر.

لكن العديد من الجزيئات لها أكثر من ذرتين. في الجزيء الكبير، لكل زوجين متجاورين من الذرات رابطة كيميائية وبُعد اتزان. إذا أعطيت هذا الجزيء طاقة إضافية، فإنه سيتذبذب بطريقة معقدة ربما تنتقل الطاقة بين الذرات المختلفة والروابط الكيميائية. ستستمر الذرات في الجزيء في الاهتزاز إلى أن يقوم شيء ما بإزالة الطاقة الإضافية من الجزيء.

مثل جميع السوائل والجوامد، فإن جذع الشجرة المحترق هو مجرد تجمع هائل من الذرات والجزيئات، متماسكة مع بعضها بواسطة روابط كيميائية ذات قوى مختلفة. هذه الجسيمات تدفع وتسحب بعضها البعض حينما تتذبذب حول بُعد اتزانها. إن حركتها هي حركة حرارية، والطاقة المتضمنة في هذا الاهتزاز غير المنتظم هي طاقة حرارية. بما أن الطاقة الحرارية موزعة على الذرات ويتم تبادلها بينها بشكل لا يمكن التنبؤ به، فإنه لا يمكن استخدامها مباشرة للقيام بشغل.

تحقق من فهمك # ٢: عندما تصطدم الذرات (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما تتصادم ذرتا نيتروجين مستقلتان ببعضهما، ما هي القوى التي تواجهانها؟

الحرارة ودرجة الحرارة

كل شيء يحتوي على طاقة حرارية، من جذع الشجرة المحترق الساخن إلى مذكي النار المعدني البارد والذي تستخدمه لتحريك النار. لكن هذا لا يعني أن الطاقة الحرارية موزعة بالتساوي. ماذا يحدث للطاقة الحرارية عندما تدفع الجذع بمذكي النار؟

عندما يتلامس مذكي النار بالجذع يبدآن بتبادل طاقة حرارية. في الواقع، يصبح الجسمان جسما واحدا أكبر، وتبدأ الطاقة الحرارية التي كانت متحركة بين الذرات في كل جسم بالتدفق عبر نقاط الاتصال بينهما. بما أن كل جسم يبدأ بكمية معينة من الطاقة الحرارية، فإن الطاقة تتحرك في كلا الاتجاهين عبر نقاط الاتصال. ومع هذا، قد يوجد محصلة تدفق من أحد الجسمين للآخر. لكي نتنبأ باتجاه هذا التدفق، فإننا نعرّف درجة حرارة كل من الجسمين.

درجة الحرارة هي الكمية التي تحدد في أي اتجاه، إن وجد، ستتدفق الطاقة الحرارية بشكل طبيعي بين جسمين. إذا لم تتدفق أي طاقة حرارية عندما يتصل جسمان ببعضهما، فإن هذين الجسمين هما في حالة اتزان حراري ودرجات حرارتهما متساوية. لكن إذا تدفقت طاقة حرارية من الجسم الأول للثاني، فإن الجسم الأول أسخن من الثاني.

يُصنّف مقياس درجة الحرارة الأجسام تبعا للاتجاه الذي ستتدفق فيه الطاقة الحرارية بين أي زوجين من الأجسام. الجسم الذي له درجة حرارة أكبر سينقل الحرارة دائما للجسم الذي له درجة حرارة أقل، والجسمان اللذان لهما نفس درجة حرارة سيكونان دائما في حالة اتزان حراري. لذا فإن جذع الشجرة المحترق سينقل طاقة حرارية لمذكي النار البارد. نقول أن الجذع المحترق ساخن لأنه يميل لنقل الطاقة الحرارية لمعظم الأجسام، بينما مذكي النار بارد لأن معظم الأجسام تميل لنقل طاقة حرارية إليه.

الطاقة التي تتدفق من جسم لآخر بسبب اختلاف في درجات حرارتهما تسمى حرارة. الحرارة هي طاقة حرارية متحركة. على وجه التحديد، الجذع المحترق لا يحتوي على حرارة؛ بل يحتوي على طاقة حرارية. ولكن عندما ينقل ذلك الجذع طاقة لمذكي النار البارد بسبب اختلاف درجات حرارتهما، فإن الحرارة هي التي تتدفق من الجذع إلى مذكي النار. (للإطلاع على ملاحظة تاريخية حول فهم الحرارة، (انظر٥١)

إن تعريفنا الحديث لدرجة الحرارة يمكنه أن يرتب الأجسام حولنا من الأسخن إلى الأبرد، ولكنه لا يحدد كمية درجة الحرارة بأي طريقة فريدة. يمكنك أن تصنع مقياس درجة حرارة خاصاً بك بمقارنة كل زوجين من الأجسام لرؤية الاتجاه الذي تتدفق فيه الحرارة بينهما، لكن من المحتمل أنك لن تستمتع بذلك. من الأفضل أن تستخدم مقياس درجة حرارة قياسياً مثل المقياس المئوي (السلزيوس)، أو الفهرنهايتي، أو المطلق (كالفن). تستند مقاييس درجة الحرارة القياسية على متوسط طاقة الجسم الحركية الحرارية لكل ذرة. كلما كان للذرة طاقة حركية أكثر، في المتوسط، أصبحت حركة الجسم أكثر نشاطا وزادت الطاقة الحرارية التي ينقلها لذرات جسم آخر عن طريق أجزاء مجهرية من الشغل. الشغل المجهري هو في الحقيقة الذي يمرر الحرارة بين الأجسام - دفعة صغيرة هنا وسحب صغير هناك، وكل ذلك عند المقياس الذري. بما أن الجسم الذي له طاقة حركية حرارية متوسطة لكل ذرة أكبر سيمرر الحرارة لجسم ذي طاقة أقل، فإنه من المنطق تخصيص درجات الحرارة وفقا لمتوسط الطاقات الحركية الحرارية المتوسطة لكل ذرة.

إن المقياس المئوي (السلزيوس)، والفهرنهايتي، والمطلق (كالفن) جميعها تقيس درجات الحرارة بهذا الشكل. في كل مقياس، تعكس الدرجة الواحدة أو وحدة الزيادة في درجة الحرارة زيادةً محددة في متوسط الطاقة الحركية الحرارية لكل ذرة. تستند العلاقة بين متوسط الطاقة الحركية الحرارية لكل ذرة ودرجة الحرارة المخصصة على العديد من الشروط القياسية: الصفر المطلق، ودرجة تجمد الماء، ودرجة غليان الماء. (تذكّر من قسم ١,٥ أن الصفر المطلق هو درجة الحرارة التي أزيلت عندها كل الطاقة الحرارية من الجسم.) متى ما تم تخصيص درجات حرارة معينة لاثنين من هذه الشروط القياسية، فإنه يتم تثبيت مقياس درجة الحرارة بأكمله. على سبيل المثال، يُبنى مقياس الحرارة المئوي (السلزيوس) حول كون $0°C$ درجة تجمد الماء و$100\ C°$ درجة غليان الماء. درجات حرارة الشروط القياسية الثلاثة موضحة في جدول ١,١,٧.

٥١ قبل عصر بينجامن تومبسون، المعروف بالكونت رمفورد (الفيزيائي ورجل الدولة البريطاني والأمريكي المولد، ١٧٥٣ - ١٨١٤م)، كان الاعتقاد أن الحرارة عبارة عن مائع يسمى كالوريك والمتضمن داخل الأجسام. نقض تومبسون نظرية الكالوريك بالاستدلال بأن ثقب المدفع يُنتج كمية من الحرارة لا تنضب. من ضمن إسهاماته العلمية والتقنية، طوّر تومبسون طرق الطبخ والتسخين. قام بإعادة تصميم المواقد وطوّر الصمام المنظم لتيار السحب في الموقد لتخفيض الدخان وتحسين انتقال الحرارة للحجرة. عاش تومبسون أيضاً حياة مليئة بالمغامرات المدهشة وارتفاعات وانخفاضات عظيمة في الثروة. هرب تومبسون من نيوهامشر في عام ١٧٧٥ لأنه كان موالياً لبريطانيا، وهرب من لندن عام ١٧٨٢ لأنه كان مشتبهاً بكونه جاسوساً فرنسياً، وعند دراسته للحرارة كان يُعدّ من ضمن أقوى الأشخاص في بافاريا.

جدول ١،١،٧: درجات حرارة عدد من الشروط القياسية، مقاسة في ثلاثة مقاييس درجات حرارة: المئوي (سلزيوس)، والمطلق (كالفن)، والفهرنهايت

الشرط القياسي	المئوي (سلزيوس)°C	المطلق (كالفن)K	الفهرنهايت°F
الصفر المطلق	-273.15	0	-459.67
تجمد الماء	0	273.15	32
غليان الماء	100	373.15	212

تحقق من فهمك # ٣: الأصابع المتجمدة (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

إذا التقطت مكعب جليد، فإن يدك تشعر بالبرودة فجأة. في أي اتجاه تتدفق الحرارة؟

النيران المفتوحة ومواقد الخشب

افترض أنك احتجت لطريقة سهلة لتدفئة غرفتك. أقدم وأبسط الطرق هي أن توقد نارا في منتصف أرضية الغرفة. سوف ينتج الخشب المحترق طاقة حرارية، والتي ستتدفق كحرارة في الغرفة الباردة. لكن كيف ينتج الخشب المحترق طاقة حرارية؟

هذه الطاقة الحرارية تنطلق من قبل تفاعل كيميائي بين الجزيئات في الخشب والأكسجين في الهواء. تذكر أن الذرات تقوم بشغل عندما تتجمع سوية في روابط كيميائية وأن مقدار الشغل المبذول يعتمد على أي الذرات ترتبط ببعضها. على سبيل المثال، في حين يمكن لذرات الكربون والهيدروجين أن ترتبط ببعضها لتكوّن جزيئات هيدروكربونية، فإن هذه الذرات تكوّن روابط أقوى بكثير مع ذرات الأكسجين. وهكذا، مع أنه قد يتطلب تفكيك جزيء هيدروكربوني شغلا، إلا أن الشغل المبذول من قِبل ذرات الهيدروجين والكربون عند ارتباطهما بذرات الأكسجين يفوق ذلك بكثير. عندما يحترق جزيء هيدروكربوني في الأكسجين، فإن جزيئات جديدة مترابطة بإحكام تتشكل وتنطلق طاقة كيميائية كامنة على شكل طاقة حرارية. نواتج التفاعل الناتجة من احتراق الهيدروكربون في الهواء هي في الأصل الماء وثاني أكسيد الكربون.

يتكوّن الخشب في الغالب من سيليولوز، وهو جزيء كربوهايدراتي طويل. تحتوي الكربوهيدرات على ذرات كربون، وهيدروجين، وأكسجين. بالرغم من وجود بعض من ذرات الأكسجين، فإن الكربوهيدرات ما تزال تحترق بشكل جيد لتنتج ماء وثاني أكسيد الكربون. عندما تشعل الخشب بعود ثقاب، فأنت توفّر الطاقة المطلوبة لكسر الروابط الكيميائية القديمة لكي تتمكن الروابط الجديدة من التشكّل. هذه الطاقة المبدئية تسمى طاقة التنشيط – أي الطاقة المطلوبة لبدء التفاعل الكيميائي. إن الحرارة من لهب عود الثقاب تعطي الخشب طاقة حرارية كافية لكسر الروابط الكيميائية بين الذرات المختلفة وبدء التفاعل.

لسوء الحظ، الخشب ليس سيليولوزاً صافياً. فهو يحتوي أيضا على العديد من المواد الصمغية (الرتنج) المعقدة والتي لا تحترق بشكل جيد وتنتج دخاناً. إذا خططت لاستنشاق الهواء الذي تحرق فيه الوقود، فإن الخشب هو اختيار سيء. ستكون في حال أفضل بحرق الكيروسين والغاز الطبيعي، الذَين يتكونان تقريباً من الهيدروكربون الصافي ويحترقان بشكل نظيف. في الواقع، يمكن تحويل الخشب لوقود أنظف بطبخه في موقد معزول من الهواء لإزالة جميع الرتنج المتطاير. هذه العملية تحوّل الخشب إلى فحم، والذي يحترق ليُشكّل ثاني أكسيد كربون، وبخار ماء، ورماداً صافية تقريباً.

لكن حتى باستخدام وقود احتراق نظيف، فإن مبدأ النار المباشرة في الغرفة له أضرار عديدة: إنها تستهلك الأكسجين في الغرفة وتشكّل خطراً أمنياً. ومع هذا، فإن النار قامت بتدفئة المنازل لآلاف السنين. مع أن المدافئ التي يُحرق فيها الخشب لها مداخن تحمل الأدخنة الضارة بعيداً، إلا أن الدخان المتصاعد يأخذ معه معظم طاقة النار الحرارية وبعضا من هواء

الغرفة. لذلك فإن الغرفة التي تدفأ بواسطة مدفأة الخشب في الغالب تكون باردة بعيدا عن المدفأة نفسها - يتسرب الهواء البارد الخارجي خلال الشقوق لاستبدال الهواء المنسحب للأعلى في المدخنة. حتى عند استخدام وقود احتراق نظيف بدون مدخنة، فإنه لا توجد أي حلول بسيطة لمشاكل الأكسجين والأمن.

ومثل المدفأة، فإن موقد الخشب يرسل أدخنة من الخشب المحترق لأعلى المدخنة. لكن قبل أن تتمكن طاقته الحرارية من اتباع الأدخنة للخارج، فإن موقد الخشب المصمم بشكل جيد ينقل معظم هذه الطاقة إلى الغرفة. الموقد الخشبي هو مثال لمبدّل حرارة - وهو أداة تنقل الحرارة دون أن تنقل الجزيئات الساخنة ذاتها. دخان الموقد الخشبي لا يدخل الغرفة على الإطلاق لكن حرارة ذلك الدخان تدخل. الفرن الغازي الموضح في الشكل (٣،١،٧) أيضاً يستخدم مبدّل حرارة.



شكل ٣،١،٧: تحرق هذه المدفئة الحديثة الغاز الطبيعي في خزانة احتراق على شكل حرف S. تنفخ مروحة في قاع المدفئة هواء نقيا مرورا بالسطح الخارجي لخزانة الاحتراق ثم يوزّع الهواء المسخّن بين الغرف.

يحتوي الفحم المحترق والغازات الساخنة داخل الموقد الخشبي على الكثير من الطاقة الحرارية وهي أكثر سخونة من هواء الغرفة. بسبب هذا الاختلاف في درجة الحرارة، فإن الحرارة تميل للتدفق من النار إلى الغرفة. الذي ليس واضحا إلى الآن هو كيفية انتقال تلك الحرارة.

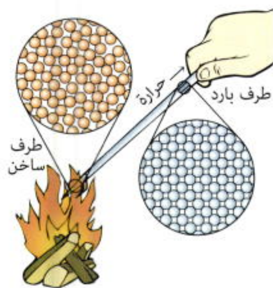
هناك ثلاث آليات رئيسية تنتقل بها الحرارة من النار إلى الغرفة: التوصيل، والحمل، والإشعاع. يُحسن موقد الخشب استخدام الثلاث آليات بشكل رائع بحيث أن معظم الطاقة الحرارية المنطلقة من الخشب المحترق تنتقل إلى الغرفة. دعنا نفحص هذه الآليات الثلاثة لنقل الحرارة، بدءاً بالتوصيل.

تحقق من فهمك # ٤: الشعور بالحرارة (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

يمكنك أن تصنع حزمة حرارية بتغليف مناشف ساخنة ومبللة في ورق بلاستيكي. هذه الحزمة ستدفئ عضلة مصابة لكنها لن تبللها. هل تتحرك الطاقة الحرارية في هذه الحالة؟

انتقال الحرارة خلال المعدن: التوصيل

يحدث التوصيل عندما تتدفق الحرارة خلال مادة ساكنة. تنتقل الحرارة من منطقة ساخنة إلى منطقة باردة لكن الذرات والجزيئات لا تنتقل. على سبيل المثال، إذا وضعت رأس مذكي النار المعدني في النار، فإن مقبض مذكي النار سيصبح ساخنا تدريجيا أثناء ما ينقل المعدن الحرارة.



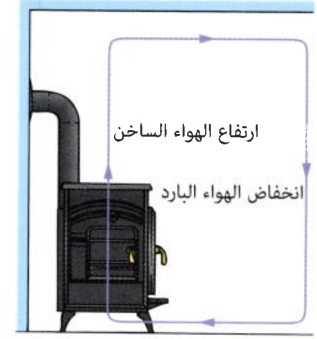
شكل ٤،١،٧: عندما يكون أحد طرفي مذكي النار أسخن من الطرف الآخر، فإن ذرات الطرف الساخن تتذبذب بشدة أكبر من ذرات الطرف البارد. ثم يوصل مذكي النار الحرارة من الطرف الساخن إلى الطرف البارد. بعض من هذه الحرارة توصّل عن طريق التفاعلات بين الذرات المتجاورة. لكن في مذكي النار المعدني، معظم الحرارة توصّل عن طريق الإلكترونات الحرة، والتي تحمل الطاقة الحرارية مسافات طويلة من ذرة لأخرى.

يتم توصيل بعض من هذه الحرارة عن طريق التفاعلات بين الذرات المتجاورة. تدفع الذرات المتذبذبة على بعضها بشكل متكرر، فتقوم بشغل مجهري أثناء ذلك وتتبادل كميات صغيرة من الطاقة الحركية الحرارية. بهذا الشكل، تتدفق الطاقة الحرارية عشوائيا من الذرة إلى الذرة المجاورة.

لكن عندما يكون رأس مذكي النار أسخن من مقبضه، فإن التدفق لا يعود عشوائيا تماما. الذرات الموجودة في الرأس الساخن لها طاقة حركية حرارية أكبر لتتبادلها مع الذرات المجاورة لها مقارنة بالذرات الموجودة في المقبض البارد. تفضّل التبادلات بشكل إحصائي تدفق الطاقة الحرارية بعيدا عن الرأس الساخن وباتجاه المقبض البارد. هذا التدفق للطاقة الحرارية من السخونة إلى البرودة خلال مذكي النار هو التوصيل (شكل ٤،١،٧).

ولكن هذه الطريقة، أي التبادل من ذرة لذرة، ليست هي الطريقة الوحيدة لتوصيل الحرارة في المواد. في المعدن، الناقلون الأساسيون للحرارة هم في الواقع الإلكترونات الحرة - أي الجسيمات الصغيرة السالبة الشحنة والتي تكوّن الأجزاء الخارجية في الذرة. عندما تنضم الذرات سوية لتشكيل معدن، فإن بعض الإلكترونات تتوقف عن كونها متّبعة لذرة بذاتها وتتحرك تقريبا بحرية في كافة أنحاء المعدن. هذه الإلكترونات الحرة يمكنها أن تحمل كهرباء (كما سنناقش في الفصل العاشر) وهي أيضا جيدة في نقل الحرارة.

تساهم الإلكترونات الحرة في عملية التبادل بين الذرات لتوصيل الحرارة لأنها هي أيضا تستطيع أن تدفع على



شكل ٥،١،٧: عندما يكون الموقد ساخنا، فإن الحمل يحمل الحرارة من أسطحه إلى سقف وجدران الغرفة. يصعد الهواء الساخن للأعلى، بدعم من قوة الطفو، ويتم استبداله بالهواء الأبرد من الأرضية. بعد حين يبرد الهواء الساخن ويهبط. عندها يعود الهواء باتجاه الموقد ليكرر الدورة.

الذرات المتذبذبة وتتبادل طاقة حركية حرارية معها. لكن في حين يمكن للذرات تمرير طاقة حرارية من ذرة لذرة مجاورة فقط، إلا أن الإلكترونات الحرة يمكنها السير لمسافات كبيرة بين الأزواج المتبادلة ويمكنها تحريك الطاقة الحرارية بسرعة من مكان لآخر.

إن السهولة التي تحرك بها الإلكترونات الحرارة في المعدن تفسّر لماذا يكون للمعادن توصيل حراري أعلى بالعموم من غير المعادن. الموصلية الحرارية هي مقياس لسرعة تدفق الحرارة خلال المادة عندما تتعرض لاختلاف في درجات الحرارة. الموصلات الجيدة للكهرباء – مثل النحاس، والفضة، والألمونيوم، والذهب – هي أيضا موصلات جيدة للحرارة. الموصلات الرديئة للكهرباء – مثل الفولاذ المقاوم للصدأ (stainless steel)، والعوازل مثل البلاستيك والزجاج – هي أيضا موصلات رديئة للحرارة. هناك بعض الاستثناءات لهذا القانون. قطع الألماس، مثلاً، موصلات رديئة جدا للكهرباء لكنها موصلات رائعة للحرارة. بالطبع، سيكون من السذاجة صنع موقد من الألماس: ففي نهاية الأمر، يحترق الألماس.

التوصيل هو الذي يحرك الطاقة الحرارية من داخل موقد الخشب لخارجه. لا تتحرك أي ذرات خلال جدران الموقد المعدنية، فقط تتحرك الحرارة. إذن يعمل التوصيل كمصفاة، يفصل الطاقة الحرارية المرغوب بها من الدخان والغازات الضارة غير المرغوب بها والتي من ثم تصعد في المدخنة.

وهكذا يجعل التوصيل السطح الخارجي للموقد ساخنا بحيث يتحتم على الحرارة أن تتدفق منه للغرفة الباردة. لكن ما الذي يحمل الحرارة إلى الغرفة؟ إذا لمست الموقد، فإن التوصيل سينقل فورا كمية هائلة من الحرارة لجلدك وسوف تُحرق. لكن حتى دون لمس الموقد، فأنت تدرك درجة حرارته العالية. إنه ينقل الحرارة إلى الغرفة عن طريق الحمل والإشعاع.

تحقق من فهمك #٥: ساخن جدا لا يمكن الإمساك به (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

بعض مقابض القدور تظل باردة أثناء الطبخ بينما مقابض قدور أخرى تصبح ساخنة بشكل غير مريح. ما الذي يحدد أي من المقابض تظل باردة وأيها تصبح ساخنة؟

تحرك الحرارة مع الهواء: الحمل

يحدث الحمل عندما ينقل مائع متحرك الحرارة من جسم أسخن لجسم أبرد. تتحرك الحرارة كطاقة حرارية في المائع بحيث يتحركان سوية. في الغالب يتّبع المائع مسارا دائريا بين الجسمين، فيحمل الحرارة من الجسم الأسخن ويعطيها للجسم الأبرد ثم يعود للجسم الأسخن ليبدأ الكرّة من جديد.

كثيراً ما تحدث هذه الدورة بشكل طبيعي. حينما يدفأ المائع بالقرب من الجسم الأسخن، فإن كثافته تقل ويطفو للأعلى، مرفوعاً بقوة الطفو. عندما يبرد المائع بالقرب من الجسم الأبرد، فإن كثافته تزيد ويهبط للأسفل.

وهكذا، فالهواء الذي سُخِّن بملامسة الموقد يرتفع باتجاه السقف ويُستبدل بهواء أبرد من الأرضية (شكل ٥،١،٧). بعد حين، سيبرد هذا الهواء المسخّن ويهبط. عندما يصل هذا الهواء للأرضية، فإنه ينسحب باتجاه الموقد الساخن ليبدأ الدورة مرة أخرى. هذا الهواء المتحرك هو تيار حمل، والمسار الدائري الذي يتبعه هو خلية حمل. داخل الغرفة، تحمل تيارات الحمل الحرارة للأعلى وللخارج من الموقد إلى السقف والجدران. عندما تضع يدك فوق الموقد، تشعر بتيار الحمل وهو يرتفع للأعلى أثناء ما ينقل حرارة ليدك.

الحمل الطبيعي جيد في تسخين الهواء الذي فوق الموقد، لكن معظم هذا الهواء الساخن ينتهي به المطاف بالقرب من السقف. مع أن بعض الهواء الساخن سينجرف بعد حين للأسفل حيث تقف، فإن الحمل يحتاج بعض الأحيان لمساعدة. إن إضافة مروحة في السقف ستساعد في تحريك الهواء الساخن حول الغرفة وتجعل الموقد أكثر كفاءة. هذا الحمل الإجباري مازال ينقل الحرارة من الموقد الساخن إلى شاغلي الغرفة الأبرد، لكنه لا يعتمد على قوة الطفو لإبقاء دوران الهواء. كلما زادت سرعة تحرك الهواء، زادت الحرارة التي يمكن أن ينقلها من الأجسام الساخنة للأجسام الباردة.

تحقق من فهمك #٦: الحرارة والرياح (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما تُدفئ أشعة الشمس الأرض المجاورة لكتلة باردة من الماء، سيبدأ نسيم بالهبوب من الماء باتجاه الأرض. فسّر ذلك.

انتقال الحرارة كضوء: الإشعاع

هناك آلية واحدة أخرى مهمة لنقل الحرارة: الإشعاع. حينما تتذبذب الجسيمات داخل مادة بطاقة حرارية، فإنها تبعث وتمتص إشعاعاً كهرومغناطيسياً. هذا الإشعاع يتكوّن من موجات كهرومغناطيسية، والتي تتضمّن موجات الراديو، والمايكروويف، والأشعة تحت الحمراء، والضوء المرئي وفوق البنفسجي.

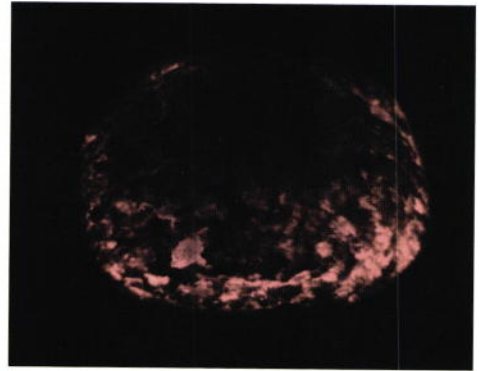
سوف ندرس الأشعة الكهرومغناطيسية في الفصل الثالث عشر والرابع عشر. أما الآن، فالشيء الأكثر أهمية هو أن هذه الأشعة يمكنها أن تحمل طاقة حرارية. عندما تتدفق الحرارة من جسم ساخن لجسم بارد على هيئة أشعة كهرومغناطيسية، نقول أن الحرارة تُنقل بواسطة أشعة حرارية أو ببساطة بواسطة الإشعاع. على خلاف التوصيل والحمل، والتي تعتمد على ذرات أو جزيئات أو إلكترونات لحمل الحرارة، فإن الإشعاع يحدث مباشرة خلال الفراغ. يحدث انتقال الحرارة الإشعاعي حتى عندما لا يكون بين الجسمين أي مادة.

إن أنواع الموجات الكهرومغناطيسية في الإشعاع الحراري لجسم تعتمد على درجة حرارته. في حين يبعث الجسم الأبرد موجات راديو ومايكروويف وضوءاً تحت الأحمر فقط، إلا أن الجسم الأسخن يمكنه أيضا أن يبعث ضوءاً مرئياً أو حتى فوق بنفسجي. الوهج الأحمر لفحم ساخن في الموقد هو الإشعاع الحراري لذلك الفحم.

بما أن أعيننا حساسة فقط للضوء المرئي، فإننا لا نستطيع رؤية جميع الإشعاع الحراري المنبعث من جسم، حتى وإن كان ساخنا. لكن بغض النظر عن مقدرتنا لرؤيته أو عدمها، فإن الأشعة الكهرومغناطيسية تحتوي على طاقة وتنقل الحرارة لأي شيء يستطيع امتصاصها. مع أن كل الأشياء تبعث إشعاعاً حرارياً، إلا أن مقدار هذا الانبعاث يعتمد على درجة الحرارة: كلما زادت حرارة الجسم، زاد الإشعاع الحراري الذي يبعثه. عندما يقابل جسمان بعضهما البعض، فإن الأشعة الحرارية ستتحرك بينهما في كلا الاتجاهين. ولكن الجسم الأسخن سيسيطر على هذا التبادل الإشعاعي للطاقة الحرارية، مؤديا لمحصلة انتقال طاقة حرارية للجسم الأبرد. إن تبادلات الطاقة الحرارية عن طريق الإشعاع دائما تنقل الحرارة من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد.

ينقل الإشعاع الكثير من الحرارة من سطح الموقد إلى الأجسام المحيطة. إن الموقد يجعل الغرفة تسبح في الضوء تحت الأحمر، والذي يُدفئ كل شيء يصل إليه. لتشجيع انتقال الحرارة الإشعاعي، فإنه في الغالب يتم طلاء الموقد ومدخنته بطلاء أسود. إن اللون الأسود لا يقتصر على امتصاص الضوء بشكل جيد، بل إنه أيضا يبعث الضوء الحراري بشكل جيد (شكل ٦،١،٧). إذا سخّنت مذكي النار الأسود حتى يصبح أحمر اللون، فإنه سيتوهج بتألق أكبر من مذكي النار الأبيض أو الفضي أو الشفاف. لرؤية كيف أن السطح الأبيض أو الفضي أو الشفاف رديء الامتصاص للضوء، انظر للسطح عندما يكون باردا. لرؤية كيف أنه باعث رديء للضوء الحراري أيضا، انظر للسطح عندما يكون ساخنا.

بإذن من لوي بلومفيلد





شكل ٦،١،٧: يتوهج قالب فحم ساخن في الظلام (يسار). ولكن تكشف الصورة الفوتوغرافية أن سطح الفحم رمادي اللون في الحقيقة وبالتالي ماص جزئي للضوء (يمين). لولا وجود الرماد الأبيض، لكان قالب الكربون الأسود باعثا مثاليا تقريباً لإشعاع الجسم الأسود وماصا مثاليا للضوء.

معتقدات خاطئة شائعة: الأجسام السوداء والضوء

المعتقد الخاطئ:

الجسم الأسود لا يبعث ضوءاً أبدا.

القرار:

في حين يمتص الجسم الأسود جميع الضوء الساقط عليه، إلا أنه لا يزال يبعث إشعاعاً حرارياً ويمكنه أن يتوهج إذا كان ساخناً بما فيه الكفاية.

حتى وإن كان الهواء في الغرفة باردا، فإنه يمكنك الشعور عادة بالضوء تحت الأحمر غير المرئي الصادر من الموقد على وجهك. عندما تحجب هذا الضوء بيديك، فإن وجهك يشعر ببرودة فجأة لأن كمية حرارة أقل تصل جلدك. إن تأثير الإشعاع الحراري هذا هو أكثر وضوحا في المدفأة أو نار المخيم، حيث الإشعاع الحراري من الفحم الحار واللهب هو الآلية الأساسية لنقل الحرارة للمنطقة المحيطة.

إجمالا، الموقد الحديث هو مبدّل حرارة ممتاز. حينما يسحب الحمل الدخان الساخن لأعلى أنبوب المدخنة الأسود الطويل، فإن الدخان يُسخّن الموقد والأنبوب. توصّل هذه الأجزاء المعدنية الحرارة لأسطحها الخارجية، والتي من ثم توزعها حول الغرفة عن طريق الحمل والإشعاع. على الرغم من أن الموقد يستهلك بعض هواء الغرفة، إلا أنه يتحكم بتدفق الهواء بواسطة صمامات بحيث يسحب فقط الهواء الكافي لحرق الخشب تماما. عموما، يستخلص الموقد الحرارة بكفاءة ونظافة وأمان من الخشب المحترق.

تحقق من فهمك #٧: البقاء دافئاً (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما تقف تحت مصباح حراري، فأنت تشعر بالدفء بالرغم من أن المصباح يبعث قليلا من الضوء المرئي. كيف تصل الحرارة لجلدك؟

تدفئة الغرفة

تشعل الموقد فتبدأ حرارته بالتدفق إلى الغرفة الباردة. تتحرك الحرارة دائما من الأسخن إلى الأبرد، فتدخل لكل جسم في الغرفة وتبدأ برفع درجة حرارته تدريجيا. على سبيل المثال، الوعاء النحاسي القريب من الموقد والذي كان باردا جدا سيصبح آجلا دافئاً ومريحاً للمس.

دعنا ننظر للعلاقة بين الحرارة المضافة لذلك الوعاء والارتفاع في درجة حرارته. بما أن درجة حرارة الوعاء تتزايد بثبات عندما تتدفق الحرارة له بثبات، فإن إجمالي الارتفاع في درجة حرارته يجب أن يكون متناسبا مع الحرارة المضافة. يُسمى

ثابت التناسب السعة الحرارية للوعاء وهي الحرارة التي يجب أن تضاف للوعاء لتتسبب في رفع درجة حرارته بوحدة واحدة. في الواقع، السعة الحرارية للوعاء هي مقياس بطئه الحراري، أي مقاومته للتغيرات في درجة الحرارة.
لكن افترض أن لديك تشكيلة من الأوعية بالقرب من الموقد، وكل منها مصنوع من مادة مختلفة. إذا تابعت درجات حرارتها، فستجد أن بعضها يسخن أسرع من البعض الآخر. حتى وإن أخذت في الاعتبار الاختلافات في كتلها وفي مقدار الحرارة التي يستقبلها كل واحد منها من الموقد، فإنك ستجد أن الأوعية المصنوعة من مواد مختلفة تستجيب بشكل مختلف للحرارة المضافة. بعض المواد أبطأ حراريا من مواد أخرى.

جدول ٢،١،٧: حرارات نوعية مقاسة بالقرب من درجة حرارة الغرفة (٢٩٣ K) والضغط الجوي.

المادة	الحرارة النوعية
الرصاص	128J/kg·K
النحاس الأصفر	380J/kg·K
النحاس	386J/kg·K
الهواء (عند حجم ثابت)	715J/kg·K
الزجاج	840J/kg·K
الألومنيوم	900J/kg·K
الهواء (عند ضغط ثابت)	1001J/kg·K
الخشب	~ 1100J/kg·K
بليكسيغلاس (بلاستيك خفيف شفاف لدن بالحرارة)	1349J/kg·K
البخار (عند ضغط ثابت)	2027J/kg·K
الجليد	2220J/kg·K
الماء	4190J/kg·K

من المعقول أن تصنَّف كل مادة حسب حرارتها النوعية لكل وحدة كتلة، وهي كمية تعرف بالحرارة النوعية. وحدة النظام العالمي SI للحرارة النوعية هي جول-لكل-كيلوجرام-كالفن (اختصارا J/kg·K). السعة الحرارية لكل وعاء هي حاصل ضرب كتلته في الحرارة النوعية للمادة المصنوع منها.

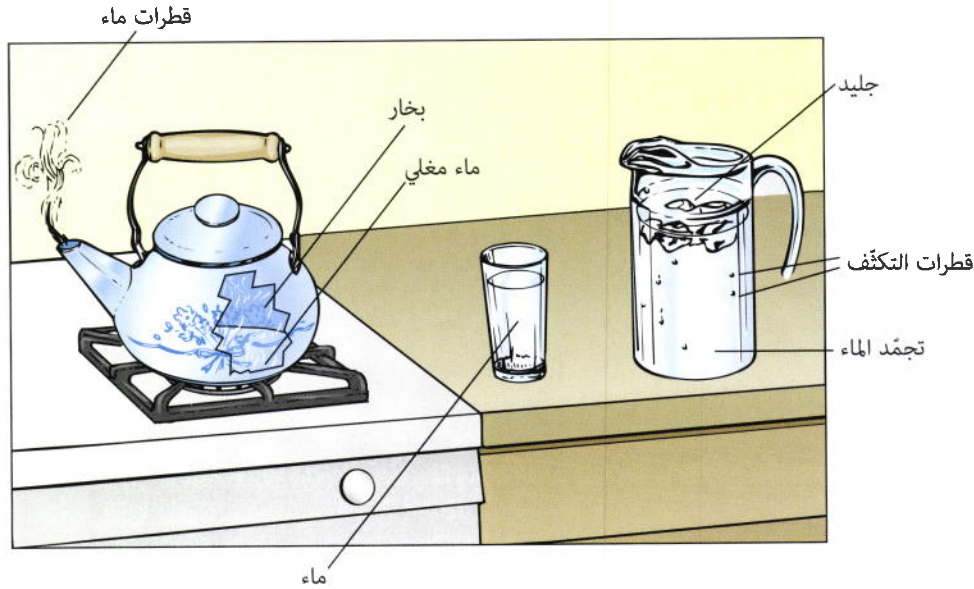
يحتوي الجدول ٢،١،٧ على الحرارة النوعية لعدد من المواد الشائعة. إن المدى الواسع من القيم يشير إلى أن كل مادة تستجيب بشكل مختلف جداً للحرارة المضافة. تعتمد الحرارة النوعية لكل مادة في الأساس على عدد الطرق المجهرية التي يمكن أن تخزن بها الطاقة الحرارية لكل كيلوجرام. تُعرف هذه الطرق المستقلة بدرجات الحرية، وكل طريقة مستقلة للتعامل مع الطاقة الحرارية تخزّن كمية طاقة حرارية متوسطة مساوية لنصف ثابت بولتزمان مضروبا بدرجة الحرارة المطلقة (1/2kT). ثابت بولتزمان، والذي تطرقنا له بادئ الأمر في قسم ٥-١، له قيمة محسوبة هي 1.381×10^{-23} J/K ووحداته هنا مكافئة لتلك التي ظهرت في قسم ٥-١.

تفسر الحرارة النوعية الصغيرة نسبيا للنحاس الأصفر لماذا يسخن الوعاء المصنوع من النحاس الأصفر بسرعة عندما تضعه على الموقد مباشرة؛ فللوعاء عدد قليل نسبيا من درجات الحرية والتي بها يخزّن طاقته الحرارية. لكن إذا أضفت مقداراً من الماء – وإن كان بسيطاً - للوعاء، فإن الحرارة النوعية للماء الكبيرة بشكل مدهش سوف تبطئ ارتفاع درجة حرارة الوعاء بشكل مثير. للماء سعة هائلة لتخزين الطاقة الحرارية.
ومثل النحاس الأصفر أو الماء، للهواء أيضا حرارة نوعية. ولكن تعتمد الحرارة النوعية للهواء على الطريقة التي تقيسها بها. وهذا بسبب أن الغازات تميل لأن تتمدد عندما تسخن. إذا أغلقت هواء في قنينة بإحكام، بحيث لا يتغير حجمه، فإنه يسخن بسهولة نسبيا؛ فالحرارة النوعية للهواء عند حجم ثابت هي 715J/kg·K. لكن إذا سمحت للهواء بالتمدد أثناء ارتفاع درجة حرارته، بحيث لا يتغير ضغطه، فإنه يكون من الصعب تسخينه. ذلك لأنه يحتاج طاقة إضافية لدفع الهواء المحيط بعيدا عن مساره أثناء تمدده؛ الحرارة النوعية للهواء عند ضغط ثابت هي 1001J/kg·K.

تحقق من فهمك # ٨: أشياء ساخنة

(للإجابة ، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما تسحب صينية معدنية بها بسكويت رطب من الفرن، فإنك تشعر في بادئ الأمر أن الصينية أسخن بكثير من البسكويت. لكن بعد قليل من الوقت، تشعر أن البسكويت أسخن من الصينية. فسّر ذلك.



٢-٧ الماء والبخار والجليد

من المحتمل أن الماء هو المادة الكيميائية الأكثر أهمية في حياتنا اليومية. فالماء مهم جدا في علم الأحياء، والمناخ، والتجارة، والصناعة، والترفيه لدرجة تجعله يستحق فصلا كاملا له وحده. علاوة على ذلك، يُظهر الماء الأطوار الثلاثة التقليدية للمادة، الصلب والسائل والغاز، ويوضح الدور الذي تلعبه الحرارة للتحويل من أحد الأطوار للآخر. في حين معظم الذي يمكننا أن نتعلمه من الماء ينطبق على أي مادة أخرى، إلا أن هناك بعض السمات للماء تكاد تكون فريدة في الطبيعة. الماء هو مادة رائعة حقا.

أسئلة للتفكير

لماذا يصبح المشروب بارداً عندما نضيف جليداً له؟ لماذا تطفو الجبال الثلجية على الماء؟ كيف يُبرّدك التعرّق؟ لماذا نشعر برطوبة حارة في أيام الطقس الرطب؟ ما هو الفرق بين التبخّر والغليان؟ كيف يختفي الثلج من الأرض حتى عندما يكون الهواء باردا في الخارج؟

تجارب يمكن القيام بها

إن القيام بتجارب باستخدام الماء شيء سهل. التقط مكعب جليد بأصابع مبللة. ماذا يحدث إذا كان قد أُخرج مكعب الجليد للتو من المجمّدة (الفريزر)؟ ماذا يحدث إذا كان قد تُرك ليذوب على الطاولة بضع دقائق؟ لماذا هناك اختلاف؟ ضع كلا مكعبي الجليد في الماء. لماذا يطفوان؟

الآن سخّن ماء الصنبور في وعاء. قبل فترة قليلة من بداية غليان الماء، سوف ترى ضباباً رقيقاً يبدأ بالتشكّل فوقه. ما هو هذا الضباب ولماذا يتشكّل؟ المس الضباب بعناية، لكن لا تحرق نفسك! يبدو الضباب رطباً لأنه يحتوي على ماء. كيف يمكن للماء أن يغادر الوعاء قبل غليان الماء؟ لاحظ الفقاعات الغازية الصغيرة على جدران الوعاء. إنها ليست بخاراً؛ من أين أتى هذا الغاز؟ عندما يغلي الماء، سيظهر ماء غازي أو بخار في الضباب. لا تلمس هذا البخار لأنه يمكن أن يحرقك بسرعة. لماذا يُطلق البخار طاقة حرارية كبيرة عندما يلامس جلدك؟

صلب وسائل وغاز: أطوار المادة

مثل معظم المواد، يوجد الماء في ثلاثة أشكال متميزة أو أطوار: الجليد الصلب، والماء السائل، والبخار الغازي (شكل ١,٢,٧). تختلف هذه الأطوار في سهولة تغير أشكالها وأحجامها. الجليد صلب – قاسٍ وغير قابل للانضغاط؛ لا يمكنك تغيير شكل مكعب

الجليد أو حجمه. الماء سائل – مائع لكنه غير قابل للانضغاط؛ يمكنك أن تغير شكل الماء في إبريق لكن لا يمكنك تغيير حجمه. البخار غازي – مائع وقابل للانضغاط؛ يمكنك أن تغير كلاً من شكل وحجم البخار الذي في غلاية الشاي.

تعكس هذه الخصائص المختلفة التراكيب المجهرية المختلفة للبخار والماء والجليد. البخار أو بخار الماء هو غاز، أي مجموعة من الجزيئات المستقلة التي تبقى متحركة بواسطة الطاقة الحرارية. ترتد جزيئات الماء هذه حول وعائها، وتتصادم بشكل متكرر ببعضها البعض أو مع الجدارن. تملأ جزيئات الماء الوعاء بشكل منتظم ويمكنها أن تتحمّل أي تغيرات في شكله أو حجمه. إن تكبير الوعاء يخفّض من كثافة البخار ببساطة ويقلل من ضغطه.

عندما تكون جزيئات الماء مستقلة عن بعضها كبخار غازي فإنه يكون لها كمية كبيرة من الطاقة الكيميائية الكامنة. يمكن لهذه الجزيئات أن تطلق بعضاً من هذه الطاقة بارتباطها مع بعضها البعض لتكوّن الماء العادي. الماء سائل، أي مجموعة غير منتظمة من الجزيئات التي تتعلّق مع بعضها البعض بواسطة روابط كيميائية. بما أن هذه الروابط ليست قوية جدا، فإن الجزيئات في الماء يمكنها أن تستخدم طاقة حرارية لكسر الروابط مؤقتا ثم تغير الشركاء في الرابطة. تسمح عملية إعادة الربط هذه للماء بتغيير شكله لذا فهو سائل. لكن على الرغم من مرونتها إلا أن هذه الروابط تستطيع أن تضم جزيئات الماء سوية بشكل محكم بحيث حتى ضغطها لا يستطيع أن يضمها بإحكام أكثر. ولهذا فالماء غير قابل للانضغاط.

إن الجزيئات في الماء يمكنها أن تطلق طاقة كيميائية كامنة أكثر بارتباطها سوية بصلابة كجليد. الجليد صلب، أي مجموعة صلبة من الجزيئات المترابطة كيميائيا. مثل معظم الجوامد، فإن الجليد بلوري – فجزيئات الماء فيه مرتبة في شبكة منظمة تمتد لمسافات طويلة وتسبب أسطح البلورة الجميلة المشاهدة على رقائق الثلج والصقيع. إن تركيب الجليد البلوري مقيّد جدا بحيث أن جزيئات الماء فيه لا يمكنها أن تستخدم الطاقة الحرارية لتغيير شركاء الرابطة، وبناء على ذلك لا يمكن للجليد أن يتغير في الشكل.
كما أن التراكم المنتظم للبرتقال في البقالة يأخذ حجما أقل من الكومة غير المرتبة، فإن الجامد البلوري يكاد يحتل دائماً حجما أقل من السائل غير المنتظم المقابل. وبالتالي يكون الطور الصلب لمادة نموذجية أكثر كثافة من الطور السائل لنفس المادة، لذا فإن الطور الصلب يغوص في الطور السائل.

هناك فقط مادة واحدة شائعة تخالف تلك القاعدة: الماء. إن التركيب البلوري للماء مفتوح بشكل استثنائي وكثافته منخفضة بشكل مدهش. الجليد الصلب يُعد فريدا تقريباً في الطبيعة، وهو أقل كثافة بعض الشيء من الماء السائل وبالتالي فإن الجليد يطفو على الماء. ولهذا تطفو الجبال الجليدية على المحيط المفتوح وتطفو مكعبات الجليد في مشروبك. في الحقيقة، يصل الماء لأقصى كثافة له عند حوالي 4 °C (39 °F).

تحقق من فهمك #١: أمتزلج؟ (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

حينما تتجمد بحيرة، أين يبدأ تكوّن الجليد؟





بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ١,٢,٧: أطوار الماء الثلاثة؛ الصلب (الجليد)، والسائل (الماء)، والغاز (البخار).

ذوبان الجليد وتجمد الماء

إن الجليد الموجود في المجمدة (الفريزر) بارد جدا، درجة حرارته في العادة -18°C (0°F). عندما تضع هذا الجليد على منضدة دافئة، فإن الحرارة تتدفق لداخله وترتفع درجة حرارته. يبقى الجليد صلبا إلى أن تصل درجة حرارته 0°C (32°F). عند هذه النقطة، يتوقف الجليد عن الزيادة في الدفء ويبدأ بالذوبان. الذوبان هو تحوّل في الطور، وهو تحوّل من الطور الصلب المنتظم إلى الطور السائل غير المنتظم. يحدث هذا التحوّل عندما تكسر الحرارة بعض الروابط الكيميائية بين جزيئات الماء وتسمح للجزيئات بالتحرك مرورا ببعضها البعض. يتحوّل الجليد المذاب إلى ماء، ويفقد شكله الصلب وتركيبه البلوري.

درجة الصفر المئوي (السلزيوس) هي درجة حرارة ذوبان الجليد، أي درجة الحرارة التي تُستخدم عندها الحرارة في كسر الروابط وتحويل الجليد للماء، بدلا من جعل الجليد أكثر سخونة. يظل خليط الجليد والماء عند 0°C إلى أن يذوب كل الجليد. عندما لا يبقى سوى الماء، فإن الحرارة مرة أخرى تتسبب في رفع درجة حرارته.

إن كمية الحرارة المستخدمة لتحويل كتلة معينة من الصلب لسائل، دون تغيير درجة حرارتها، تسمى الحرارة الكامنة للذوبان، أو اصطلاحيا، الحرارة الكامنة للانصهار. الروابط بين جزيئات الماء في الجليد قوية بما يكفي لإعطاء الجليد حرارة كامنة للذوبان هائلة جدا: يتطلب حوالي 333,000J من الحرارة لتحويل 1kg من الجليد عند 0°C إلى 1kg من الماء عند 0°C. بما أن الحرارة النوعية للماء هي 4190J/kg·K، فإن نفس هذه الكمية من الحرارة سترفع درجة حرارة 1kg من الماء السائل بحوالي 80°C. وهكذا، يتطلب تقريبا نفس الحرارة لإذابة مكعب جليد ما يتطلبه تسخين الماء الناتج إلى درجة غليانه.

تظهر الحرارة الكامنة للذوبان مرة أخرى عندما تُبرّد الماء عودة لدرجة حرارة إذابته ويبدأ بالتجمّد. التجمّد هو تغير آخر في الطور، تغير من الطور السائل غير المنتظم إلى الطور الصلب المنتظم. حينما تزيل الحرارة من الماء عند 0°C، فإن الماء يتجمّد لجليد بدلا من أن يصبح أكثر برودة. بما أن جزيئات الماء تطلق طاقة عندما ترتبط ببعضها لتشكّل بلورات الجليد، فإن الماء يطلق حرارة عند تجمّده. الحرارة المطلقة أثناء تغيير كتلة معينة من سائل لصلب، دون تغيير درجة حرارتها، هي مرة أخرى الحرارة الكامنة للذوبان. يجب أن تضيف كمية محددة من الحرارة للجليد لإذابته ويجب أن تنزع نفس تلك الكمية من الحرارة من الماء لجعله صلبا.

تحقق من فهمك # ٢: إبقاء المحاصيل دافئة (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

كثيراً ما يقوم مزارعو الفواكه برش محاصيلهم بالماء لحمايتها من التجمد في الطقس البارد جدا. كيف يمكن للماء السائل منع الفواكه من التجمد؟

اتزان الطور: المغادرة والهبوط

لقد رأينا أن الجليد له درجة حرارة ذوبان، لذا دعنا الآن نرى لماذا له درجة حرارة ذوبان. للقيام بذلك، يجب أن ننظر للسطح الفاصل بين الجليد الصلب والماء السائل. كلما كان الطوران متصلين، فإنهما يتبادلان جزيئات ماء عبر السطح الفاصل بينهما. تتحرر جزيئات الماء بانتظام من الجليد لتدخل إلى الماء وكثيراً ما تهبط الجزيئات من الماء لتلتصق بالجليد. بعبارة أخرى، تغادر جزيئات الماء الجليد وتهبط عليه دائما، مثل الطائرات في مطار نشط.

مع أنك لا تستطيع رؤية عمليات المغادرة والهبوط الفردية، إلا أنه يمكنك ملاحظة تأثيرهم الإجمالي. إذا تجاوزت عمليات المغادرة عمليات الهبوط، فإن الجليد سيتحول تدريجيا لماء. وإذا تجاوزت عمليات الهبوط عمليات المغادرة، فإن الماء سيتحول تدريجيا لجليد. وإذا توازنت العمليتان، فإن الجليد والماء يمكنهما التواجد سوية لحد غير معروف – وهذه حالة تعرف باتزان الطور.

تلعب درجة الحرارة دورا هاما في هذا الاتزان لأنها تؤثر على المعدل الذي تغادر به جزيئات الماء الجليد. فكلما سخن الجليد،



بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ٢،٢،٧ : يمكن أن يتواجد الجليد والماء سوية فقط عند 0°C، وهي درجة حرارة ذوبان الجليد.

تمكنت جزيئات الماء على سطحه من تجميع طاقة حرارية كافية للتحرر والمغادرة مراراً. تحت درجة حرارة ذوبان الجليد، تغادر جزيئات الماء الجليد بشكل نادر جدا بحيث لا توازن عملية الهبوط، ويتحوّل الماء كلية إلى جليد. فوق درجة حرارة ذوبان الجليد، تغادر جزيئات الماء الجليد مراراً بحيث تتجاوز عملية الهبوط، ويتحوّل الجليد كلية إلى ماء. فقط عند درجة حرارة الذوبان يتوازن معدلا المغادرة والهبوط بحيث يتواجد الجليد والماء سوية في اتزان طوري.

إن الحرارة الكامنة لذوبان الجليد الهائلة لها تأثير استقراري على اتزان الطور بين الجليد والماء. كلما تم مزج الجليد مع الماء، فإن درجة حرارة الخليط ستنحرف بسرعة نـحو 0°C. ذلك لأنه لو كانت درجة حرارة الخليط أعلى من 0°C، فإن الجليد سيذوب - وهذا تحوّل في الطور يمتص الحرارة اللازمة للذوبان وبالتالي يخفّض درجة حرارة الخليط نـحو 0°C. وإذا كانت درجة حرارة الخليط أقل من 0°C، فإن الماء سيتجمّد - وهذا تحوّل في الطور يطلق الحرارة اللازمة للذوبان وبالتالي يرفع درجة حرارة الخليط نـحو 0°C.

طالما أن الخليط لا يستنفد الجليد أو الماء، فإن درجة حرارته ستصل آجلا 0°C وتظل عندها حتى إذا أضفت أو نزعت حرارة منه. أي حرارة تضيفها للخليط تستخدم في إذابة مزيد من الجليد، وليس في رفع درجة حرارته. وأي حرارة تنتزعها من الخليط تأتي من تجمّد مزيد من الماء، وليس من خفض درجة حرارته. لهذا تظل كأس مائك المثلج عند 0°C، حتى في أسخن أو أبرد طقس (شكل 2.2.7).

تحقق من فهمك #٣: الماء المثلّج (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

في مطعم، تحتوي كأس مائك على 25٪ جليد بينما تحتوي كأس ماء صديقك على 75٪ جليد. ماء مَن منكما أبرد، أم أن درجة حرارتهما متساوية؟

تبخير الماء وتكثيف البخار

إن سطح الماء المفتوح هو سطح فاصل نشط آخر بين الأطوار، لكن في هذه المرة يتبادل الماء السائل الجزيئات مع البخار الغازي. جزيئات الماء تغادره بنشاط إلى البخار وتهبط على الماء من البخار، مرة أخرى مثل الطائرات في مطار نشط.

مع أن هذا التبادل الهائج للجزيئات مثير، إلا أن ما يهم أكثر هو تأثيره الإجمالي. إذا غادرت الماء جزيئات أكثر من العائدة إليه، فإن الماء يتبخر تدريجيا لبخار. التبخير هو تحوّل في الطور من السائل إلى الغاز. من ناحية أخرى، إذا هبطت على الماء جزيئات أكثر من التي تغادره، فإن البخار يتكثّف تدريجيا إلى ماء. التكثّف هو تحوّل في الطور من الغاز إلى السائل. وإذا توازن الهبوط والمغادرة، فإن الماء والبخار يتواجدان سوية في اتزان طوري.

هذان التحولان بين الطورين لهما تداعيات حرارية هائلة. بما أن الجزيئات في الماء تتعلق ببعضها بروابط كيميائية، فإنه يتطلب طاقة لفصلها. بالرغم من أن الروابط بين جزيئات الماء أضعف من الروابط داخل جزيئات الماء، فإنه لا يزال يتطلب طاقة كبيرة لتحويل الماء إلى بخار.

الحرارة اللازمة لتحويل كتلة معينة من سائل إلى غاز، دون تغيير درجة حرارتها، تسمى الحرارة الكامنة للتبخر، أو اصطلاحا، الحرارة الكامنة للتبخير. الحرارة الكامنة لتبخر الماء هائلة حقا لأن جزيئات الماء صعب فصلها بشكل مدهش. يتطلب حوالي 2,300,000J من الحرارة لتحويل 1kg من الماء عند درجة حرارة 100 C° إلى 1kg من البخار عند 100°C. تلك الكمية نفسها من الحرارة يمكنها أن ترفع درجة حرارة 1kg من

الماء لأكثر من 500°C !

أنت تدرك حرارة التبخر هذه أكثر في أيام فصل الصيف الحارة، عندما يسحب العرق المتبخر من جلدك حرارة منك ويخفّض درجة حرارتك. حينما يغادر كل جزيء من جزيئات الماء العرق ليتحوّل لبخار، فإنه يُجمّع أكثر من قسمته العادلة من الطاقة الحرارية من بيئته المحيطة ويحملها معه كطاقة كيميائية كامنة. بالتالي تترُكك جزيئات الماء المغادرة محروما من الطاقة الحرارية فتشعر ببرودة.

تظهر الحرارة الكامنة للتبخر مرة أخرى عندما يتكثف البخار وتطلق جزيئات الماء المتجمعة طاقتها الكيميائية الكامنة على شكل حرارة. كمية الحرارة المتحررة عند تحويل كتلة معينة من الغاز إلى سائل، دون تغيير درجة حرارتها، هي مرة أخرى الحرارة الكامنة للتبخر. يجب أن تضيف كمية محددة من الحرارة للماء لتبخيره ويجب أن تزيل نفس هذه الكمية من الحرارة من البخار لتكثيفه.

إن كمية الحرارة الهائلة الصادرة عند تكثيف البخار كثيراً ما تستخدم لطبخ الطعام أو للتدفئة في المباني القديمة. عندما تطبخ الخضروات بالبخار، فأنت تسمح للبخار بالتكثّف على الخضروات وتحويل الطاقة إليها. تستخدم الغلاية المزدوجة البخار المكثف لتحويل الحرارة من المُشعل إلى حاوية الطبخ بطريقة منضبطة.

تحقق من فهمك #٤: وقت الشاي (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

تسخن غلاية الماء بسرعة على الموقد لكنها تستغرق وقتا أطول للتبخر. لماذا يستغرق الماء وقتا طويلا ليتحول لبخار؟

الرطوبة النسبية

بالرغم من أننا فحصنا تداعيات التبخر والتكثف، إلا أننا لم نرَ إلى الآن أي شروط تحدد متى يحدثان. يتعلق الموضوع كله في نهاية الأمر بمغادرة وهبوط جزيئات الماء، فدعنا نلقي نظرة على سبب فوز إحدى العمليتين على الأخرى.

إن المؤشر الأساسي لتحديد ما إذا كان الماء سيتبخر أو البخار سيتكثف هو الرطوبة النسبية. تقيس الرطوبة النسبية معدل هبوط جزيئات الماء كنسبة من معدل المغادرة. عندما تكون الرطوبة النسبية 100%، فإن المعدلين متساويان والماء والبخار في اتزان طوري. لكن إذا كانت الرطوبة النسبية أقل من 100%، فإن معدل الهبوط أقل من معدل المغادرة ويتبخر الماء. وإذا كانت الرطوبة النسبية أكثر من 100%، فإن معدل الهبوط أكبر من معدل المغادرة ويتكثف البخار.

تعتمد الرطوبة النسبية على درجة الحرارة وعلى كثافة البخار. تؤثر درجة الحرارة على معدل المغادرة. كلما كان الماء أكثر حرارة، زادت الطاقة الحرارية التي يحتويها وزاد تكرار مغادرة جزيئات الماء سطحه لتصبح غازاً. الزيادة في درجة الحرارة - على حدة - سترفع من معدل المغادرة وبالتالي تخفّض من الرطوبة النسبية. وهكذا تفضّل درجات الحرارة المرتفعة التبخر.

كثافة جزيئات الماء في البخار تؤثر على معدل الهبوط. كلما كان البخار أكثر كثافة، زاد هبوط جزيئات الماء على الماء لتصبح سائلاً. الزيادة في كثافة البخار – على حدة – سترفع معدل الهبوط وبالتالي تزيد الرطوبة النسبية. وهكذا تفضّل كثافات البخار المرتفعة التكثف. حتى وإن كان ذلك البخار مختلطا بالهواء، كما هو الحال في الحياة اليومية، فإن جزيئات الهواء تعمل كمتفرجين سلبيين. كثافة جزيئات الماء وحدها تحدد الرطوبة النسبية للهواء.

تلعب الرطوبة النسبية دورا مهما في مواجهات كثيرة في الحياة اليومية. عندما تكون الرطوبة النسبية منخفضة، فإن الماء يتبخر بسرعة فيبدو الهواء جافا. التعرق يبرّدك فعليا. عندما تكون الرطوبة النسبية مرتفعة (قريبة من 100%)، فإن الماء لا يكاد يتبخر

ويبدو الهواء رطبا. يتعلق العرق بجلدك ولا يبرّدك كثيرا.

وعندما تتجاوز الرطوبة النسبية ‎100%‎، ربما بسبب انخفاض مفاجئ في درجة الحرارة، فإن البخار يبدأ بالتكثف في كل مكان. تتكوّن قطرات ماء على الأسطح كندى أو تتكوّن مباشرة في الهواء كضباب كثيف، أو ضباب خفيف أو غيوم. إذا ظلت الرطوبة مرتفعة، فإن هذه القطرات تصبح أكبر وتسقط في النهاية كمطر.

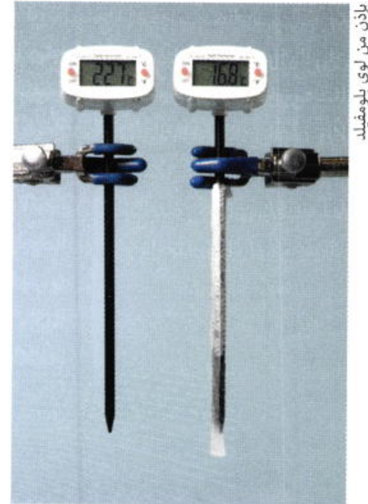
يمكنك أن تقيس الرطوبة النسبية بملاحظة التبريد المصاحب للتبخير. الطريقة الأكثر شيوعا تتضمن ترمومترين (شكل ٣,٢,٧)، يحيط ببصيلة أحدهما قماش مبلل (مستودع الزئبق في الترمومتر) (يمين). الماء المتبخر من القماش المبلل يبرّد الترمومتر إلى أن يصل الماء لاتزان طوري مع البخار في الهواء فيتوقف التبخر. كلما كان الهواء أكثر جفافا، أصبح الترمومتر أبرد. عندها يمكن استخدام درجتي حرارة الترمومترين لتحديد الرطوبة النسبية، في الغالب بمساعدة قيم مجدولة.

تحقق من فهمك # ٥: رؤية نَفَسَك (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما تطلق زفيراً في يوم بارد، فإنك في الغالب ترى ضباباً خفيفاً يظهر من فمك. فسّر ذلك.

تسامي الجليد وترسيب البخار

لقد فحصنا تحولات الطور بين الجليد والماء وبين الماء والبخار. هذا يجلبنا لتحوّلات الطور بين الجليد والبخار. من الغريب أن جزيئات الماء يمكنها أن تغادر الجليد لتصبح بخاراً ويمكنها أن تهبط من البخار لتصبح جليداً. في الحقيقة، الجليد والبخار يتبادلان باستمرار جزيئات الماء حتى وإن لم يكن يوجد أي ماء سائل على الإطلاق. كالمعتاد، يحدث هذا التبادل لجزيئات الماء على سطح الجليد، السطح الفاصل بين الجليد والبخار. بما أننا مهتمون أكثر بمحصلة حركة الجزيئات، فإنه ينتهي الأمر عند معدلات المغادرة والهبوط على الجليد. إذا غادرت الجزيئات الجليد أكثر من هبوطها، فإن الجليد يتسامى. التسامي هو تحوّل الطور من الصلب إلى الغاز. وإذا هبطت الجزيئات على الجليد أكثر من مغادرتها، فإن البخار يترسب. الترسيب هو تحوّل الطور من الغاز إلى الصلب. مرة أخرى، تقيس الرطوبة النسبية معدل الهبوط كنسبة من معدل المغادرة. عند رطوبة نسبية ‎100%‎، يكون الجليد والبخار في حالة اتزان طوري.



بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ٣,٢,٧: يمكنك تحديد الرطوبة النسبية للهواء باستخدام ترمومترين - أحدهما له قماش مبلل ملفوف حول بصيلته (يمين). يبرّد التبخر بصيلة الترمومتر المبللة بمقدار مرتبط برطوبة الهواء النسبية. كلما كان الهواء أكثر جفافا، أصبحت بصيلة الترمومتر المبللة أبرد.

عندما تكون الرطوبة النسبية أقل من ‎100%‎، فإن الجليد يتسامى. هذا التأثير سبب في حدوث عدد من الظواهر المألوفة. عندما يكون الطقس باردا وجافا، فإن الثلج يختفي تدريجيا من الأرض دون أي ذوبان. في حالة الرطوبة المنخفضة في مجمّدة (فريزر) مانعة لتكون الثلج، فإن مكعبات الجليد تنكمش ببطء لأحجام صغيرة. وعندما تترك طعاماً بلا غطاء في نفس المجمدة (الفريزر) المانعة لتكوّن الثلج، فإنه يجف بعد حين. مع أن هذا «الاحتراق المتجمد» هو مصدر إزعاج في البيت، إلا أن التسامي من الأطعمة المجمدة يستخدم تجاريا لإعداد الأطعمة المجففة بالتجميد.

وعندما تتجاوز الرطوبة النسبية ‎100%‎، فإن البخار يترسب. تنتج هذه العملية العديد من التأثيرات المألوفة الأخرى. يتشكّل الجليد على النوافذ الباردة والعشب الذي يتعرض للهواء الرطب. في حالة الرطوبة النسبية المرتفعة في المجمدة التي تسمح بتكون الثلج، يتجمع الثلج والجليد على الجدران ويتطلب ذلك إزالة دورية لها. وتتكوّن الرقائق الثلجية في السحب وتهبط برشاقة إلى الأرض.

تحقق من فهمك # ٦: النتانة المختفية (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

كرات الاسفنيك (النفتالين) هي حبوب بلورية لها رائحة وتستخدم في حفظ الملابس الصوفية من هجوم الحشرات. إذا رششتها في خزانة وانتظرت لسنين، فإن كرات الاسفنيك ستختفي. كيف تختفي هذه الكرات؟

غلي الماء

بوجود ثلاثة أطوار للمادة وستة تحوّلات بين الأطوار، يبدو أننا استنفدنا جميع الاحتمالات. فإذاً أين موقع الغليان في هذه الصورة؟ الغليان ببساطة هو شكل مسرّع للتبخر حيث تنمو فقاعات من البخار الصافي عن طريق التبخر داخل الماء ذاته. لفهم الغليان، دعنا نلقي نظرة على التفاعل بين الماء والبخار.

افترض أننا أغلقنا بعضا من الماء بإحكام في وعاء خالٍ من الهواء وأبقيناه عند درجة حرارة ثابتة. سيتبخر الماء كبخار إلى أن تصل الرطوبة النسبية داخل الوعاء إلى ١٠٠٪. عند تلك النقطة، سيكون الماء والبخار قد وصلا للاتزان الطوري؛ سيكون للبخار الكثافة المناسبة بحيث أن جزيئات الماء تهبط على الماء بنفس معدل مغادرتها. البخار في حالة اتزان كثافته يقال عنه أنه مشبّع.
بالطبع، تعتمد كثافة ذلك البخار المشبّع على درجة حرارة الوعاء. إذا سخّنت الوعاء، فإن جزيئات الماء ستغادر الماء بمعدل أكبر وسيتطلب من كثافة البخار أن تزيد لكي توازن بين معدل الهبوط ومعدل المغادرة. وهكذا فإن كثافة البخار المشبّع هي دالة تزايدية في درجة الحرارة.

تحدد كثافة البخار المشبّع، سوية مع درجة حرارته، ضغطه – الضغط داخل وعائنا. إذا سخنّا الوعاء، فإن كثافة البخار المشبّع ستزيد وكذلك ضغطه. بالقرب من درجة حرارة الغرفة، يكون ضغط البخار المشبّع بضعاً بالمائة من الضغط الجوي. لكن عندما تقترب درجة الحرارة من 100°C ‏(212°F)، فإن ضغط البخار المشبّع يقترب من الضغط الجوي.

بتلك الخلفية، افترض أننا وضعنا فقاعة من البخار المشبّع الصافي في ماء عند درجة حرارة الغرفة. بما أن الضغط داخل تلك الفقاعة هو أقل بكثير من الضغط الجوي، فإن الماء المحيط سيندفع للداخل ويضغطها. حينما ينكمش حجم فقاعة البخار، فإن البخار سيتجاوز كثافة تشبعه ويبدأ بالتكثّف. في وقت يكاد لا يذكر، ستتحطم الفقاعة ولا يصبح لها وجود.

افترض الآن أننا بدأنا بتسخين الماء على الموقد. حينما تزداد درجة الحرارة، فإن كلاً من كثافة البخار المشبّع وضغطه سيزيدان. في بادئ الأمر، تظل فقاقيع البخار المشبّع غير مستقرة؛ يتم تحطيمها بسرعة بفعل الضغط الجوي. لكن عندما تقترب درجة حرارة الماء من 100°C، فإن شيئا مدهشا يحدث: فجأة تصبح فقاعات البخار المشبع مستقرة ويمكن للماء أن يبدأ بالغليان (شكل ٤,٢,٧). عند درجة الحرارة تلك، أي درجة حرارة غليان الماء، فإن ضغط البخار المشبّع يصل للضغط الجوي ويمكن لفقاعات البخار المشبّع أن تنجو داخل الماء إلى مدى غير محدد. والأكثر إدهاشا، أنه يمكن لهذه الفقاعات أن تنمو بالتبخير؛ فسطح كل فقاعة هو سطح فاصل بين الماء والبخار، لذا فعند إضافة حرارة للماء، فإن الماء يمكنه أن يتحوّل لبخار ويكبّر الفقاعة. بالرغم من أن الفقاعات تطفو بسرعة إلى سطح الماء وتتفرقع، إلا أن فقاعات جديدة يمكنها أن تأخذ مكانها فورا.

إن الغليان يحوّل الماء إلى بخار بسرعة عالية بحيث يستهلك تقريبا أي كمية حرارة تضيفها للماء. لذلك من الصعب جدا تسخين الماء فوق درجة حرارة غليانه. وعاء الماء المفتوح والموضوع على الموقد يسخن إلى درجة حرارة غليان الماء ثم يظل عند درجة الحرارة تلك إلى أن يتحوّل كل الماء إلى بخار. فقط عند ذلك يمكن لدرجة حرارة الوعاء أن تبدأ بالارتفاع مرة أخرى.
تسمح لك درجة الحرارة المحددة والثابتة لغليان الماء بطبخ الخضروات أو بيضة بمعدل معيّن. عندما تضع بيضة في ماء مغلي، فإنها تُطبخ في ثلاث دقائق لأنها في حالة اتصال بالماء عند درجة حرارة غليانه.

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ٤,٢,٧: يغلي الماء عند 100°C، عندما لا يعود الضغط الجوي قادرا على تحطيم فقاعات بخار الماء.

تحقق من فهمك # ٧: اختفاء الفقاعات (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

تقوم بتسخين الماء في وعاء على الموقد. قُبيل غليان الماء بشكل جيد، تبدأ فقاعات البخار بالارتفاع من قاع الوعاء لكن تختفي قبل أن تصل سطح الماء. ماذا يحدث لتلك الفقاعات؟

تغيير درجة حرارة غليان الماء

تعتمد درجة حرارة غليان الماء على الضغط المحيط. بالنسبة لوعاء مفتوح أو مقلاة، فإن ذلك الضغط هو الضغط الجوي. ولكن الضغط الجوي يقل مع زيادة الارتفاع ويعتمد بعض الشيء على الطقس. يغلي الماء عند 100°C (212°F) بالقرب من مستوى سطح الماء لكنه يغلي عند فقط 90°C (194°F) على ارتفاع 3000m (9800ft). هذا الانخفاض في درجة حرارة غليان الماء مع زيادة الارتفاع يفسّر لماذا يجب أن تُكيّف العديد من وصفات الطعام للاستخدام في المرتفعات العالية. عند 3000m، تُطبخ البيضة ببطء في الماء المغلي لأنها محاطة بماء درجة حرارته 90°C، وليس ماء درجة حرارته 100°C. نفس هذه المشكلة تبطئ طبخ الأرز، والفاصوليا، والعديد من الأطعمة الأخرى عند الارتفاعات العالية.

عند الضغوط المنخفضة بشكل كافٍ، يغلي الماء حتى عند درجة حرارة الغرفة أو أقل من ذلك. على النقيض الآخر، يمكن للضغط العالي أن يمنع الماء من الغليان إلى أن يصبح ساخنا جدا. كثيراً ما تعمل الغلايات في المحركات البخارية ومحطات الكهرباء عند هذه الضغوط العالية بحيث أن درجة حرارة غليان الماء داخلها قد تتجاوز 300°C (572°F).

إحدى الطرق لتقليل الزمن اللازم للطبخ هي استخدام قدر الضغط، وهو وعاء يغلق على البخار بإحكام بحيث يمكن للضغط داخله أن يتجاوز الضغط الجوي. هذه الزيادة في الضغط تمنع الغليان إلى أن تصبح درجة حرارة الماء أعلى بكثير من 100°C. إذا أخضعت الماء لضعف الضغط الجوي عند مستوى سطح الماء، فإنه لن يغلي إلى أن يصل لدرجة حرارة 121°C (250°F). تُطبخ البيضة بسرعة جدا عند درجة الحرارة هذه، وكذلك الخضروات وأطعمة أخرى.

ولكن لمجرد أن الماء يمكنه أن يغلي، لا يعني أنه سوف يغلي. يعتمد الغليان على نشوء فقاعات بذرية صغيرة جدا والتي من ثم تنمو عن طريق التبخير. بدون نشوء هذه الفقاعات البذرية، فلن يغلي الماء. بسبب أن التنوّي أو تكوّن بذور فقاعية يكاد لا يتم إطلاقا عشوائيا في الماء تحت درجة حرارة 300°C، فلا بد أن هناك شيئا آخر يُنشئ هذه البذور الفقاعية. معظم التنوي يحدث عند مواقع العيوب أو البقع الساخنة على الوعاء أو عند الشوائب في السائل. في الغالب تحبس مواقع التنوي الهواء أو غازات دائمة أخرى ثم تعمل كحاضنات لبذور فقاعات البخار. الاعتماد على هذه المواقع المحددة للتنوي يفسّر لماذا فقاعات الماء المغلي، مثل تلك الموجودة في المشروبات الغازية، في الغالب تنساب للأعلى من مواضع محددة على أوعيتها.

عندما تسخّن الماء بشكل منتظم في وعاء زجاجي نظيف، فإنه قد لا يغلي بشكل صحيح عند درجة حرارة غليانه. للزجاج سلاسة مثل التي للسائل حتى عند المقياس الذري ونادراً ما يساعد في تكوّن بذور فقاعية. بدون وجود مواقع تنوّي طويلة الحياة، فإن الماء قد يتوقف عن تكوين بذرات فقاعية ويتوقف عن الغليان. بمجرد أن يتوقف الغليان، فإن درجة حرارة الماء يمكنها أن ترتفع فوق درجة حرارة الغليان بحيث يصبح فائق التسخين.

إن الماء الفائق التسخين، والذي يتكوّن بسهولة ومراراً في فرن المايكروويف يمكن أن يصبح خطرا جدا. إن لمسه بشوكة، أو إضافة سكر أو ملح له، أو حتى مجرد نقر حاويته يمكنه أن يُنشئ غليان عنيفاً أو حتى متفجّراً (شكل 5.2.7). كلما تجاوزت درجة حرارة الماء درجة حرارة غليانه، أمكنه إطلاق طاقة أكثر فجأة إذا غلي فجأة. كن حذرا عندما تسخّن ماء في فرن المايكروويف، وخصوصا في وعاء زجاجي أو مصقول. إذا لم يبدُ أن الماء يغلي بشكل صحيح على الرغم من أنه ساخن جدا، أدرك أنه قد يكون فائق التسخين. الخطوة الأكثر أمانا أن تبقى بعيدا عنه إلى أن يبرد.

هناك طريقة أخرى مثيرة لتغيير درجة حرارة غليان الماء: أن تذيب مواداً كيميائية فيه. المادة الكيميائية المذابة تُبقي جزيئات الماء مشغولة بحيث يقل احتمال مغادرتها للماء لتصبح بخاراً، أو جليداً إن كان ذلك هو الشأن. بما أن المواد الكيميائية المذابة تثبط جزيئات الماء من مغادرة الطور السائل للماء، فإنها تقمع أي تحوّل في الطور والذي يقلل من كمية الماء في الطور السائل. لذلك فإن إذابة السكر أو الملح في الماء تبطئ تبخره ويرفع من درجة حرارة غليانه. ولهذا أيضا يتجمد الماء المالح عند درجات حرارة أقل منها للماء العذب وكذلك يميل الملح لإذابة الجليد. على النقيض من ذلك، الرمل لا يذيب الجليد لأنه لا يذوب في الماء.



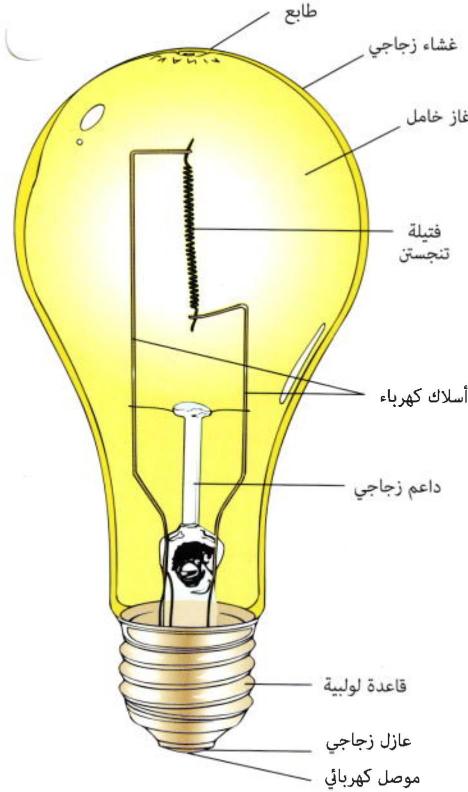
بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ٥,٢,٧: الماء الموجود في كوب القياس الزجاجي أصبح فائق التسخين في فرن المايكروويف ثم تم إثارته بشوكة. فجَر الغليان المتفجّر جميع الماء لخارج الكوب في جزء من الثانية.

تحقق من فهمك # ٨: حادث محظوظ

(للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

تسحب كوباً خزفياً مليئاً بالماء الساخن من فرن المايكروويف وتضيف له ملعقة من القهوة الفورية. تتكوّن فقاعات بشكل مسلٍّ ويرتش قليلا على الطاولة. ماذا حدث؟



٧-٣ المصابيح المتوهجة

لأكثر من قرن، وفرت المصابيح المتوهجة الضوء بنقرة مفتاح. أغلق اكتشاف هذه المصابيح عصر الشموع وأضواء الغاز ودفع تطوير القدرة الكهربائية. في حين نمت تشكيلة كبيرة من المصابيح المتوهجة عبر السنين لتشمل كل شيء من المصابيح الحرارية إلى مصابيح الهالوجين الأمامية في السيارات، إلا أن جميع المصابيح المتوهجة لها في أساسها شيء واحد بسيط: فتيلة ساخنة جدا.

أسئلة للتفكير

أي جزء من أجزاء المصباح الضوئي الذي يبعث الضوء؟ كيف يتشابه المصباح الضوئي والنار أو الشمعة؟ كيف يختلف عنهما؟ ما هي ألوان الضوء التي يمكن أن يبعثها مصباح ضوئي بسيط غير مطلي؟ لماذا تسوّد قمة المصباح الضوئي مع العمر؟ ماذا يحدث عندما ينحرق المصباح الضوئي؟

تجارب يمكن القيام بها

ألقِ نظرة على بضعة مصابيح متوهجة. جرّب أن تفتح وتغلق واحدة منها. هل الانتقالات لحظية؟ قف في غرفة مظلمة مع إبقاء عينيك مغمضتين ثم افتح عينيك فجأة، مباشرة بعد غلق المصباح المتوهج. هل يمكنك رؤية إظلام المصباح؟ كيف يتغير سطوع ولون المصباح مع الوقت؟

قارن بين لون الضوء الصادر من مصباح تقليدي مع مصباح طويل العمر. أيهما يحاكي ضوء الشمس بشكل أفضل؟ أي هذين المصباحين يجب أن تستخدمه في إنارة مكتبك؟ وفي مكان ثابت في سقف يصعب الوصول إليه؟

الآن قارن كلا المصباحين مع مصباح هالوجين. كيف تختلف ألوانها؟ أي من هذه المصابيح تتوقع أن يعيش لمدة أطول في الاستعمال الطبيعي؟ هل من المفاجئ أن مصابيح الهالوجين تعيش أطول من المصابيح التقليدية؟

الضوء، ودرجة الحرارة، والألوان

الضوء من مصباح متوهج هو جزء من الإشعاع الحراري المنبعث من فتيلته السلكية الساخنة. في حين تكون معظم الموجات الكهرومغناطيسية غير مرئية، إلا أن أعيننا حساسة لمدى ضيق من الموجات والتي نسميها الضوء المرئي. أي جسم حرارته أكثر من حوالي 400°C (750°F) يبعث ضوءاً مرئياً كافياً لكي نراه في غرفة مظلمة. عند درجات الحرارة المرتفعة، هذا الضوء المرئي يصبح أكثر سطوعا ويتحول لونه من الأحمر إلى البرتقالي إلى الأصفر إلى الأبيض. عند 500°C (930°F)، يتوهج الجسم باللون الأحمر الباهت. عند 1700°C (3100°F)، فإنه يبعث لوناً برتقالياً كالشمعة. وعند 5800°C (10,500°F)، وهي درجة حرارة سطح الشمس، فإن الجسم يُعطي لونا أبيض رائعا كضوء الشمس.

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ١,٣,٧: حينما تزيد من قدرة المصباح المتوهج، فإن فتيلته تسخن أكثر وتبعث ضوءا أكثر سطوعا وأكثر بياضا. الفتيلة الباردة على اليسار خافتة وحمراء بينما الأكثر حرارة على اليمين ساطعة وبيضاء مصفرة. بما أن زجاج هذه المصابيح مبرْغل، فإنه لا يمكنك رؤية فتيلاتها مباشرة.

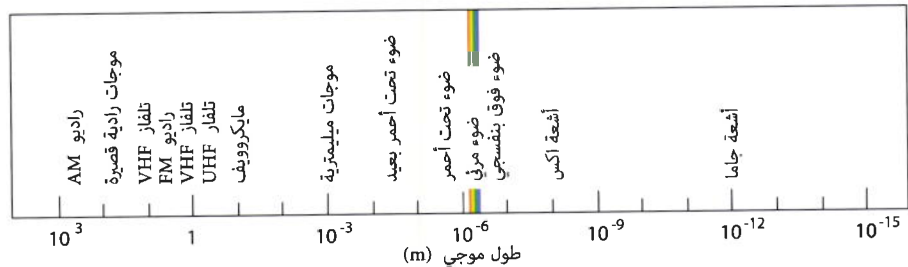
لإعادة إنتاج ضوء الشمس الأبيض الصافي، فإن فتيلة المصباح يجب أن تسخَن لدرجة حرارة 5800°C. للأسف لا يوجد أي شيء صلب عند تلك الدرجة المرتفعة من الحرارة. حتى معدن التنجستن، وهو يعد أفضل مادة معروفة لصناعة الفتيلة، يتبخر بسهولة عند درجات حرارة أعلى من 2500°C (4500°F). بما أن المصابيح المتوهجة يجب أن تعمل عند درجات الحرارة المنخفضة، فإنها في الحقيقة لا تستطيع أن تنسخ ضوء الشمس. تبعث معظم المصابيح ضوءا أصفر مبيّضاً دافئاً والذي هو لون مميز لمعدن التنجستن عند حوالي 2500°C.

يعتمد كل من سطوع الفتيلة ولونها على درجة حرارتها (شكل ١,٣,٧). بما أن الضوء يحمل طاقة، فإنه يمكننا أن نقيس سطوعه كعدد من الوات من الضوء المرئي الذي يبعثه. لكن كيف نميّز لونه؟ علاوة على ذلك، ما الذي يميّز الضوء المرئي من الأنواع غير المرئية للإشعاع الكهرومغناطيسي؟ بالرغم من أن الأجوبة الكاملة لهذه الأسئلة يجب أن تنتظر إلى الفصل الثالث عشر والرابع عشر، إلا أنه يمكننا أن نقوم ببضع ملاحظات حولها الآن.

الضوء المرئي هو جزء من الطيف المتصل للإشعاع الكهرومغناطيسي والذي يمتد من موجات الراديو عند أحد الطرفين إلى أشعة جاما في الطرف الآخر (شكل ٢,٣,٧). تتميّز الأنواع المختلفة للإشعاع الكهرومغناطيسي عن طريق طولها الموجي، أي المسافة بين قمم موجاتها. يمكن رؤية الطول الموجي بسهولة في الموجات على سطح بحيرة أو بحر، حيث القمم مرئية ويمكنك قياس المسافة مباشرة من قمة لأخرى. لكن في حين قمم الموجة في الموجات الكهرومغناطيسية لا يمكن ملاحظتها بسهولة، إلا أنها موجودة ويمكن قياس المسافة بينها.

إن الإشعاع الكهرومغناطيسي المنتج من قبل فتيلة ساخنة معظمه ضوء تحت الأحمر، ومرئي، وفوق البنفسجي. بالرغم من أن هذا الضوء هو جزء صغير جدا من الطيف الكهرومغناطيسي الكلي، إلا أنه مهم على وجه الخصوص في عالمنا اليومي. يعطي الشكل (٣,٣,٧) نظرة موسّعة للجزء المرئي للطيف الكهرومغناطيسي. تقابل الألوان المختلفة التي نراها لمدى معيّن من الأطوال الموجية. على سبيل المثال، يظهر الضوء الذي له طول موجي 530 نانومتر (جزء من البليون من المتر، اختصارا nm) كلون أخضر لأعيننا.

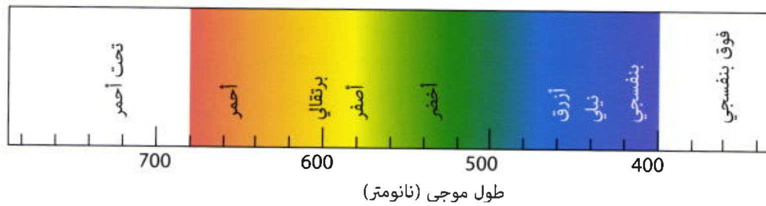
لكن الإشعاع الحراري المنبعث من فتيلة ليس موجة كهرومغناطيسية وحيدة بطول موجي معيّن. بدلا من ذلك، يتضمن الإشعاع الحراري العديد من الموجات الفريدة التي تغطّي مدى واسعاً من الموجات. بعض هذه الموجات هي لون أحمر، وبعضها أخضر، وبعضها أزرق، وبعضها غير مرئي.



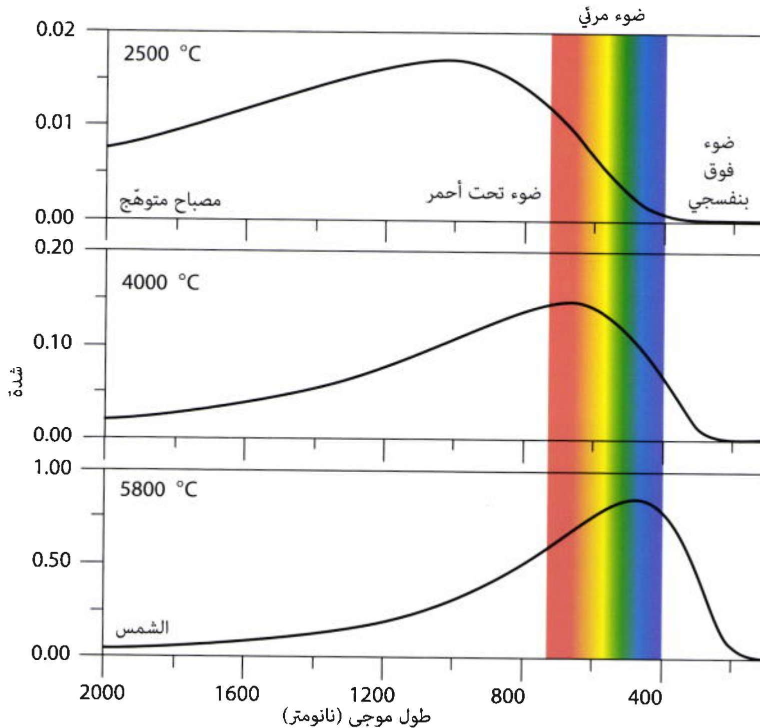
شكل ٢,٣,٧: طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي، مرتب بناء على الطول الموجي. المقياس هنا لوغاريتمي، بمعنى أن الطول الموجي يتناقص بمعامل ١٠ مع كل علامة إلى اليمين.

يعتمد توزيع الأطوال الموجية المنبعثة من الفتيلة على درجة حرارتها وخصائص سطحها، خصوصا الانبعاثية الخاصة بها- أي الكفاءة التي تبعث بها الضوء وتمتصه. الانبعاثية تقاس على مقياس من 0 إلى 1، بحيث أن 1 هو الكفاءة المثالية. الجسم الأسود تماما له انبعاثية مقدارها 1؛ فهو يمتص كل الضوء الذي يسقط عليه ويبعث ضوءا حراريا بأعلى كفاءة ممكنة. على الرغم من أن انبعاثية التنجستن هي فقط 0.43، إلا أن سلك الفتيلة ملتفة بطريقة بحيث يكون لها العديد من الأركان والزوايا المظلمة. وهكذا الفتيلة تقريبا سوداء بحيث انبعاثيتها أساسًا 1.

إن توزيع الأطوال الموجية المنبعثة من الجسم الأسود يحدد بواسطة درجة حرارته وحدها ويسمى طيف الجسم الأسود. كما ترى من الأمثلة في الشكل (٤,٣,٧)، يزداد سطوع طيف الجسم الأسود وينتقل نحو الأطوال الموجية الأقصر عندما تزداد درجة حرارته. يبعث الجسم غير الأسود إشعاعا حراريا أقل بعض الشيء، لكن ذلك الإشعاع لا يزال يسطع وينتقل باتجاه الأطوال الموجية الأقصر عندما يصبح الجسم أكثر سخونة.



شكل ٣,٣,٧: جزء من طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي حول الضوء المرئي. الأطوال الموجية مقاسة بالنانومتر (nm، أو جزء من البليون من المتر).



شكل ٤,٣,٧: توزيع الضوء المنبعث من أجسام سوداء عند 2500°C (أعلى)، و 4000°C(وسط)، و5800°C (أسفل). بالإضافة لاحتوائه على نسبة كبيرة من الضوء المرئي، فإن الجسم عند 5800°C هو أكثر سطوعا من الجسم عند 2500°C (لاحظ مقاييس الشدة المختلفة).

جدول 1.3.7: درجات الحرارة وألوان الضوء المنبعثة من الأجسام الساخنة.

الجسم	درجة الحرارة	اللون
مصباح حراري	500°C (930°F)	أحمر باهت
لهب الشمعة	1700°C (3100°F)	برتقالي خافت
فتيلة المصباح	2500°C (4500°F)	أبيض مصفر ساطع
سطح الشمس	5800°C (10,500°F)	أبيض لامع
النجم الأزرق	6000°C (10,800°F)	أبيض مزرق جاهر

تقوم أعيننا بتقييم متوسط لتوزيع الأطوال الموجية المنبعثة من قبل جسم أسود، ونرى ضوءاً محمّراً، أو برتقالياً، أو مصفراً، أو مبيضاً، أو مزرقاً بناء على درجة حرارة الجسم (جدول ١,٣,٧). درجة الحرارة المرتبطة بتوزيع معيّن للأطوال الموجية هي درجة حرارة اللون لذلك الضوء.

يمكننا الآن رؤية عيبين من العيوب الرئيسية لمصباح الضوء المتوهج: كفاءته السيئة في تحويل الطاقة الكهربائية لضوء مرئي ودرجة حرارة لونه المنخفضة. عند 2500°C، يكون حوالي 12% فقط من إشعاعه الحراري مرئياً؛ المتبقي هو ضوء تحت الأحمر غير مرئي. يجب أن تصل درجة حرارة فتيلته لـ 5000°C قبل أن تنخفض نسبة الأشعة تحت الحمراء من إشعاعها الحراري لأقل من 50 %. علاوة على ذلك، درجة حرارة لونه عند 2500°C تجعله يبدو مصفراً عند مقارنته بضوء الشمس لأنه لا يبعث ضوءاً أزرق بشكل كافٍ. معظم التطورات في الإنارة على مدى نصف القرن المنصرم ركّزت على تطوير كفاءة الطاقة ودرجة حرارة اللون.

تحقق من فهمك #١: حتى النباتات يمكن أن تبدو جميلة (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

تقيس الأقمار الصناعية درجة حرارة المناطق الزراعية من الفضاء، بحثاً عن إشارات خطر وأمراض في المحاصيل. كيف تقوم بمثل هذه القياسات؟

الفتيلة

تُسخّن فتيلة المصباح بواسطة تيار كهربائي، والذي يزودها بقدرة حرارية بالمقدار المحدد على المصباح. على سبيل المثال، فتيلة المصباح ذو 60W تنتج 60W من القدرة الحرارية من الـ 60W للقدرة الكهربائية التي يستهلكها. بما أن الفتيلة لا يمكنها تجميع الطاقة الحرارية بشكل لا نهائي، فإن درجة حرارتها ترتفع إلى أن تتدفق الطاقة الحرارية منها على صورة حرارة بالسرعة التي تُنتج بها من الكهرباء. وهكذا يبعث المصباح ذو الـ 60W قدرة حرارية مقدارها 60W للبيئة المحيطة به على شكل حرارة. معظم تلك الحرارة هو إشعاع حراري.

إن درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا التوازن في كمية الحرارة هي محددة بشكل مدهش. يعود السبب في ذلك إلى أن الإشعاع الحراري للفتيلة يزداد بسرعة مع زيادة درجة الحرارة حتى أن انحرافاً طفيفاً فوق درجة حرارة عملها الطبيعية يتسبب في جعل الفتيلة تشع طاقة حرارية أكثر من التي تنتجها من الكهرباء وبسرعة ستبرد عائدة لمستواها الطبيعي. مثل أي جسم ساخن، فإن القدرة المشعة من الفتيلة تتناسب مع الأس الرابع لدرجة حرارتها المطلقة. يمكن كتابة العلاقة الدقيقة بين درجة الحرارة والقدرة المنبعثة كمعادلة لفظية:

القدرة المنبعثة = الانبعاثية × ثابت ستيفان – بولتزمان × درجة الحرارة٤ × مساحة السطح (١,٣,٧)

ورمزيا: $P = e \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A$

وفي لغة الحياة اليومية: يشع الجلد الدافئ الكثير من الحرارة، فغطّه لتتجنب الشعور بالبرد.

تسمى هذه العلاقة بقانون ستيفان – بولتزمان، وثابت ستيفان – بولتزمان σ الذي يظهر في القانون له مقدار مقاس هو ($5.67x\ 10^{-8}\ J/(s.m^2.k^4)$. تذكر أن درجة الحرارة يجب أن تقاس بوحدة الكالفن.
إذن، زيادة درجة حرارة الفتيلة تزيد كلا من درجة حرارة لونها وسطوعها. كل من هذه الخصائص مهمة بالنسبة لك، فمن حسن حظك أنه يمكنك تعديلها بشكل مستقل بعض الشيء. ما لم تكن تستمتع بعشاء رومانسي وتريد وهج ضوء الشمعة المُحمر، فأنت في الغالب تفضّل درجات حرارة لون أعلى. وبالنسبة لمصباح متوهج، فإن هذا يعني في العادة فتيلة أكثر حرارة. لكن بمجرد أن اخترت درجة حرارة الفتيلة، فإنك لا تزال تستطيع أن تجعلها أكثر سطوعا بزيادة مساحة سطحها.

لكن بالرغم من أن مفهوم المصباح المتوهج بسيط، إلا أن إيجاد مادة يمكنها تحمّل درجات حرارة عالية جدا ليس بهذه السهولة. صُنعت الفتائل المبكرة من الكربون والبلاتين. من هاتين المادتين، أظهر الكربون أنه أكثر نجاحا. في عام ١٨٧٩، طوّر توماس أديسون مصباحاً متوهجاً بفتيلة من الكربون والذي عمل لعدة مئات من الساعات. لم يكن مصباحه المتوهج هو أول مصباح يصنع على الإطلاق لكنه في الواقع أول المصابيح العملية. (للمزيد عن فتائل الكربون، (انظر٥١))

ولكن مع أن للكربون أعلى درجة حرارة انصهار من أي عنصر آخر (3550°C أو 6422°F)، إلا أنه يتبخر بسرعة نسبياً حتى عند درجات حرارة أقل بكثير. وهكذا فإن فتيلة الكربون التي تُسخّن لدرجة حرارة قريبة من درجة حرارة انصهارها ستختفي بسرعة على شكل غاز. عندما تظهر فجوة في الفتيلة، فإنها تتوقف عن حمل الكهرباء و «تحترق». كما أن الكربون قابل للاشتعال، فيجب أن يحبس في مصباح زجاجي مُحكم يحتوي إما على غازات خاملة أو فراغ.

الاختيار الأفضل للفتائل، والمستخدم الآن فعليا في جميع المصابيح المتوهجة، هو معدن التنجستن. ينصهر التنجستن عند 3410°C (6170°F) ويتبخر ببطء شديد عند درجات حرارة أقل من تلك الدرجة. وهكذا يمكن لفتائل التنجستن أن تعمل عند درجات حرارة أعلى من فتائل الكربون، لتنتج ضوءاً غنيا أكثر بياضا. ولكن مثل الكربون فإن التنجستن الساخن يحترق في الهواء ويجب أن يُحمى في مصباح زجاجي.
لضمان أن معظم القدرة الكهربائية المارة خلال الفتيلة تتحوّل لقدرة حرارية، فإن الفتيلة يجب أن تكون طويلة ورفيعة. إن المصباح المتوهج المعتاد ذا قدرة 60W له سلك من التنجستن طوله تقريباً 20in (0.5m) وقطره 25 مايكرون (0.001in)، ملتف على شكل فتيلة طولها فقط حوالي 2cm(0.8in). لتقليل طول الفتيلة، فإنها تُلف على شكل حلزون ثنائي. أولا تُلف على شكل زنبرك رفيع عرضه حوالي 0.25mm. ثم يُلف هذا الزنبرك على شكل ملف آخر لتشكيل الفتيلة الفعلية (شكل ٥,٣,٧). إن صناعة فتيلة تنجستن معقدة مثل هذه صعبة جدا بحيث لم تتم حتى عام ١٩٣٧.

تحقق من فهمك # ٢: فقد الوهج عند دكان الحدّاد

(للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

عندما يسحب الحداد قطعة مصفرة ساخنة من الفولاذ من الفرن، فإن درجة حرارتها تهبط وتخفت بسرعة. لكنها تظل ساخنة لا يمكن لمسها عدة دقائق. لماذا تبرد القطعة بشكل أسرع في بادئ الأمر؟

دقق في أرقامك #١: برودة الفضاء البعيد

(للإجابة، انظر صفحة ٢٢٨)

افترض أن حادثا في الفضاء البعيد تركك متعرضا لبيئة درجة حرارتها قريبة من الصفر المطلق. بما أن محيطك يكاد لا يبعث أي حرارة باتجاهك، فإنك تفقد حرارة بسرعة. إذا كانت مساحة سطحك هي $2m^2$، ودرجة حرارة جلدك هي 310K، وانبعاثيتك هي 0.5، فما هو مقدار القدرة التي ستشعها؟

٥١ كان لويس هاورد لاتيمار (عالم ومخترع أمريكي-أفريقي ١٨٤٨ - ١٩٢٨م) عمره فقط ثمان سنوات عندما أدى قرار المحكمة العليا الأمريكية ضد دريد سكوت (عبد طالب بحريته ورُفض طلبه) إلى أن يصبح والده، الذي كان عبدا آبق، هاربا ومجبرا على الاختفاء. ظل لويس مع والدته وكان أداؤه جيدا في المدرسة وأصبح مصمماً ومهندساً محترفا. أثناء عمله مع منافس أديسون والذي يدعى هيرام ماكسيم، أصبح لويس خبيرا في صناعة فتائل الكربون للمصابيح المتوهجة. عندما انضم لويس لاحقا لفريق أديسون للمخترعين، "رواد أديسون"، تم سريعا استبدال فتائل أديسون الهشة بفتائل لاتيمار الكربونية القوية التي على شكل خيزران حيث وفرت المقومات الهامة والضرورية لكي تصبح مصابيح أديسون ناجحة تجاريا.

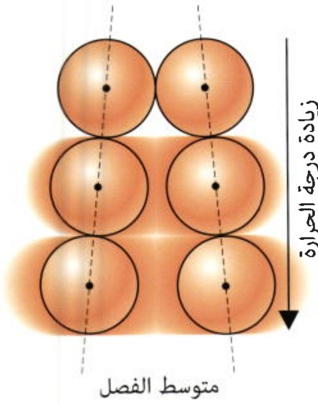


شكل ٥,٣,٧: فتيلة التنجستن لمصباح متوهج حديث هي حلزون ثنائي – أي ملف ملفوف من ملف أصغر لسلك دقيق جداً من التنجستن. يسمح الحلزون الثنائي للمصنعين بوضع طول سلك طويل في حيز صغير.

المصباح الزجاجي

لمنع الفتيلة البيضاء الساخنة من الاحتراق، فإنها تُحاط بمصباح زجاجي والذي يحتوي في الغالب على غاز خامل خالٍ من الأكسجين. هذا الغاز، في الغالب نيتروجين وأرجون، يُبطئ التبخر بردّ بعض من ذرات التنجستن الهاربة وإعادتها للفتيلة. بالرغم من أن الغاز يزيد من عمر الفتيلة، إلا أن له على الأقل عيبين. الأول، أنه يسمح للتوصيل والحمل بأخذ بعض من الحرارة من الفتيلة. الثاني، أن جسيمات التنجستن الصغيرة والتي تتكوّن في هذا الغاز ترتفع مع تيارات الحمل لتنتج بقعة مظلمة على قمة المصباح.

يُقدّم المصباح الزجاجي تحديا آخر: تشغيل الفتيلة داخله يستدعي تمرير الأسلاك خلال الزجاج. هذه الخطوة ليست سهلة لأن الزجاج والمعدن يجب أن يُختما مع بعضهما البعض بإحكام. والذي يُعقّد متطلب الختم هذا هو أن المواد تتمدد عندما ترتفع درجات حرارتها. إذا لم يتمدد الزجاج والمعدن بصورة متساوية عندما يسخن المصباح، فإن المصباح قد يُحدث تسرباً أو حتى ينكسر.



شكل ٦,٣,٧: تزداد الطاقة الحركية الحرارية لمادة صلبة بزيادة درجة حرارتها، متسببة في ارتداد ذراتها من على بعضها البعض بشدة أكبر. حينما تهتز الذرات فإنها تتنافر بشدة أكبر من تجاذبها فيزداد متوسط فصلها قليلا.

يحدث التمدد الحراري للمادة نتيجة الاهتزازات الذرية. بسبب الطاقة الحرارية فإن الذرات المتجاورة تهتز ذهابا وإيابا حول بُعد اتزانها (شكل ٦,٣,٧). هذه الحركة الاهتزازية ليست متناظرة؛ فقوة التنافر التي تواجهها الذرات عندما تكون قريبة جداً من بعضها هي أكثر صلابة من قوة التجاذب التي تواجهها عندما تكون بعيدة جدا عن بعضها. نتيجة لعدم التناظر هذا، فإن الذرات تدفع بعضها أسرع مما تجذب بعضها، وبالتالي تقضي معظم وقتها عند بعد أكبر من بُعد اتزانها. في المتوسط، يكون بُعدها الحقيقي أكبر من بُعد اتزانها، والمادة التي تتضمنها هي أكبر مما لو لم يكن هناك طاقة حرارية.

حينما ترتفع درجة حرارة جسم ما، فإن ذراته تتحرك بعيدا عن بعضها في المتوسط ويكبر الجسم في جميع الاتجاهات. إن المدى الذي يتمدد له الجسم مع زيادة درجة الحرارة يوصف في العادة بمعامل التمدد الحجمي له: أي التغير الجزئي في حجم الجسم لكل وحدة زيادة في درجة الحرارة. التغير الجزئي في الحجم هو محصلة التغير في الحجم مقسوما على الحجم الكلي. بما أن معظم المواد تتمدد فقط بمقدار صغير عندما تصبح أسخن بمقدار $1°C$ (أو $1K$)، فإن معاملات التمدد الحجمي صغيرة، في العادة $10^{-5}\ K^{-1}$ للمعادن، وحوالي $10^{-6}\ K^{-1}$ للزجاج الخاص القليل التمدد، وتقريبا $10^{-4}\ K^{-1}$ للسوائل. في المصباح، يتم اختيار الأسلاك المعدنية والزجاج بعناية بحيث يكون لهما معاملات تمدد حجمي متماثلة. حينما يسخن المصباح، تتمدد الأسلاك والزجاج سوية ويظل الختم سليماً.

تحقق من فهمك # ٣: طُبخ أكثر من اللازم (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

إذا وضعت قدراً على الموقد وملأته إلى حافته بماء بارد، فإنه سيفيض عندما تسخّنه. من أين يأتي الماء الإضافي؟

المصابيح الطويلة العمر وذات الهالوجين وذات الثلاث اتجاهات

إحدى الطرق لإطالة عمر الفتيلة هي زيادة مساحة سطحها مع تزويدها بنفس القدرة الكهربائية. بوجود مساحة سطح أكبر لإشعاع قدرة حرارية، فإن الفتيلة لا تسخن لنفس الدرجة ولا تتبخر بنفس السرعة. النتيجة هي أننا نحصل على مصباح طويل العمر. لسوء الحظ، فإن المصابيح طويلة العمر هي أكثر احمرارا من المصابيح التقليدية وأيضا أقل كفاءة في الطاقة. بما أن المصباح طويل العمر يبعث جزءاً أصغر من قدرته الداخلة كضوء مرئي، فإنه يجب أن يكون له قدرة أعلى ليُعطي إنارة مكافئة. نتيجة لذلك، فالمصابيح طويلة العمر ليست دائما صفقة رابحة؛ فالمال الذي ستوفره في استبدال المصابيح ربما يصرف على تكاليف زيادة الطاقة. عندما تختار مصابيح، فإنه من الجدير النظر في عدد اللومن – أي مقياس الاستضاءة المفيدة – التي تنتجها لكل واط من القدرة الكهربائية المستهلكة (شكل ٧,٣,٧).



بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ٧,٣,٧: مصابيح 100W مختلفة تنتج مقاديراً مختلفـة من الضوء المفيـد، كما هو مبين من قيمة اللومن المسجلة على غلافها.

من الأفضل أن تشتري مصابيح الهالوجين، والتي هي أطول عمرا وأكثر كفاءة في الطاقة مقارنة بالمصابيح التقليدية. تستخدم مصابيح الهالوجين خدعة كيميائية لإعادة بناء فتيلتها باستمرار أثناء عملها. هذه الفتيلة محصورة في أنبوب صغير من الكوارتز أو سليكات الألمونيوم، والذي يمكنه أن يتحمّل درجات الحرارة المرتفعة والمواد الكيميائية المتفاعلة (شكل ٨,٣,٧). يحتوي الأنبوب على جزيئات من عناصر الهالوجين مثل البرومين و/أو اليود. أثناء التشغيل، يصبح الأنبوب ساخنا جدا ويتفاعل الهالوجين مع أي من ذرات التنجستن على سطحها الداخلي. تشكّل الذرات المتفاعلة غازاً من جزيئات تنجستن-هالوجين والتي تنجرف خلال الأنبوب إلى أن تواجه الفتيلة الساخنة البيضاء. عندها تتفكك الجزيئات وتلتصق ذرات التنجستن بالفتيلة.

بإذن من لوي بلومفيلد



شـكل ٨,٣,٧: تعمـل مصابيـح الهالوجين هذه عند درجات حرارة أعلى من المصابيح المتوهجة العاديـة وتنتج ضوءاً أكثر بياضا. يحمـي الغلاف الزجاجـي الكبير للمصباح العلوي مصباحاً داخلياً أصغر.

تعمل الهالوجينات كعوامل إعادة التدوير، وذلك بالبحث عن ذرات التنجستن التي تبخرت من الفتيلة وإعادتها لها. لسوء الحظ، عملية إعادة التدوير هذه تغيّر ببطء من تركيب الفتيلة. تترسب ذرات التنجستن العائدة بشكل غير متساوٍ، بحيث تكوّن الفتيلة بقعاً رقيقة بشكل تدريجي وفي نهاية الأمر تحترق. ومع هذا، فإن الفتيلة تعيش لأكثر من 2000 ساعة، حتى وإن كانت تعمل عند درجات حرارة أعلى بمائة ضعف من المصابيح التقليدية. تسمح درجة حرارة الفتيلة المرتفعة لمصباح الهالوجين بإنتاج ضوء أكثر بياضا من المصابيح التقليدية وتزيد من كفاءة طاقتها.

المصابيح ذات تصانيف قدرة مختلفة لها فتائل ذات مساحات أسطح مختلفة. الفتيلة في مصباح 100W لها أربعة أضعاف مساحة سطح فتيلة في مصباح قدرته 25W وبالتالي تبعث أربعة أضعاف مقدار الضوء. لدعم هذه الأربعة أضعاف الزائدة في القدرة الحرارية، فإن فتيلة 100W تستهلك أيضا أربعة أضعاف القدرة الكهربائية. كلتا الفتيلتين تعمل عند نفس درجة الحرارة وتبعثان ضوءاً له نفس درجة حرارة اللون.

إحدى الطرق لصناعة مصباح متوهج له نتاج ضوء متغيّر هي وضع عدة فتائل مستقلة فيه. للمصباح ذي «الثلاث مستويات» فتيلتان (شكل ٩,٣,٧ و ١٠,٣,٧) والتي يمكنها أن تُفتح وتُغلق بشكل منفصل. في مصباح 50-100-150 W، فإن إحدى الفتيلتين تستخدم 50W من القدرة الكهربائية والفتيلة الأخرى تستخدم 100 W. إذا تم فتح الفتيلة ذات القدرة المنخفضة فقط، فإن المصباح المتوهج يبدو أنه مصباح ذو 50W. إذا تم فتح الفتيلة ذات القدرة المرتفعة فقط، فإن المصباح يبدو أنه مصباح 100W. لكن عندما تكون الفتيلتان مفتوحتين فإن المصباح يبدو أنه مصباح ذو 150W. بما أن إحدى الفتيلتين ستحرق قبل الأخرى، فإن المصباح يتضاءل بالانتقال من حيازة ثلاثة مستويات للضوء إلى مستوى واحد فقط.

تحقق من فهمك # ٤: التغليف المضاعف (للإجابة، انظر صفحة ٢٢٧)

في حين للمصابيح التقليدية أغلفة زجاجية رقيقة، إلا أن مصابيح الهالوجين التي تحل محلها لها أغلفة زجاجية سميكة بشكل مدهش. إذا فتحت أحد هذه الأغلفة ستجد مصباحاً زجاجياً ثانياً له حجم أصغر داخله. لماذا يتكبد صانعو المصابيح عناء وضع مصباحين منفصلين حول الفتيلة؟

خاتمة الفصل السابع

فحص هذا الفصل أدوار الطاقة الحرارية وكمية الحرارة في تشكيلة من الأشياء المألوفة. في موقد الخشب، رأينا كيف يحوّل الاحتراق الطاقة الكيميائية الكامنة المنتظمة إلى طاقة حرارية غير منتظمة، ودرسنا الطرق التي تتدفق بها هذه الطاقة الحرارية للبيئة المحيطة بالموقد: التوصيل، والحمل، والإشعاع. في الماء والبخار والجليد، فحصنا أطوار المادة الثلاثة ونظرنا كيف تتأثر الانتقالات بين هذه الأطوار بدرجة الحرارة، والحرارة، وخصائص أخرى للبيئة المحيطة بهم. في المصابيح المتوهجة، وجدنا أن الجسم الساخن بشكل كافٍ يشع بعض حرارته كضوء مرئي ورأينا أن توزيع الأطوال الموجية في هذا الضوء يعتمد على درجة حرارة الجسم.

تفسير: ترمومتر المسطرة

مثل معظم الأشياء، فإن المسطرة البلاستيكية الشفافة تتمدد عندما تسخنها. يزداد طول المسطرة بمقدار يتناسب مع الزيادة في درجة الحرارة. عندما تحوّل كمية حرارة للمسطرة، بالتنفس عليها، أو بلمسها، أو بتعريضها لمجفف الشعر، فإن درجة حرارتها ترتفع وتتمدد، وطرفها الحر يدير الدبوس والمؤشر. بما أن حركة المؤشر تتناسب مع التغير في طول المسطرة، فإنها أيضا تتناسب مع التغير في درجة حرارة الترمومتر.



شكل ٩،٣،٧: المصباح ذو الثلاث مستويات له فتيلتان منفصلتان. الفتيلة التي على اليسار أقصر وأقل سمكا من الفتيلة التي على اليمين وتبعث حوالي نصف مقدار الضوء. تطابق الثلاث مستويات المختلفة للضوء عملية فتح الفتيلة التي على اليسار، وفتح الفتيلة التي على اليمين، أو فتحهما سوية.



بإذن من لوي بلومفيلد

شكل ١٠،٣،٧: تم إزالة الغلاف الزجاجي لهذا المصباح ذي الثلاث مستويات لتوضيح فتيلتيه. تستخدم الفتيلة الأقصر والأقل سمكا (يسار) 50W، بينما تستخدم الفتيلة الأطول والأسمك (يمين) 100W.

ملخص الفصل

كيفية عمل موقد الخشب

إن الموقد يحرق الخشب في الهواء للحصول على غاز ساخن. في الحقيقة عملية الاحتراق هي تفاعل كيميائي تتفكك فيه جزيئات الخشب والهواء إلى أجزاء وتتجمع بعدها على شكل جزيئات جديدة محكمة الارتباط مثل الماء وثاني أكسيد الكربون. تطلق عملية إعادة التجميع طاقة أكبر من الطاقة المتطلبة لتفكيك جزيئات الخشب والأكسجين الأصلية. تظهر هذه الطاقة الإضافية كطاقة حرارية داخل نواتج التفاعل، لذا فهي ساخنة. بدلا من توزيع الغاز المحترق الساخن مباشرة إلى الغرفة، فإن الموقد ينقل الحرارة من الغاز المحترق إلى هواء نظيف أو ماء. يتم توصيل الحرارة خلال جدران الموقد ثم تتدفق إلى الغرفة عن طريق الحمل والإشعاع.

كيفية عمل الماء والبخار والجليد

الماء والبخار والجليد هم الأطوار السائلة والغازية والصلبة للمادة الكيميائية التي نطلق عليها اسم الماء. جزيئات الماء في الماء السائل ترتبط ببعضها بقوة كافية لتثبيت حجم الماء، لكن ليس بالقوة الكافية لإعطاء الماء شكلا صلبا. في البخار، تكون جزيئات الماء مستقلة عن بعضها فليس للغاز شكل ثابت ولا حجم ثابت. والجزيئات في الجليد مرتبطة ببعضها بصلابة في بلورات صلبة، لذا فإن الجليد صلب وحجمه ثابت.

يمكن أن يتحول الجليد إلى ماء أو العكس عند درجة حرارة انصهاره. تتسبب كمية الحرارة المضافة للجليد عند درجة الحرارة هذه في إذابة الجليد دون أن يصبح أدفأ. وتتسبب كمية الحرارة المزالة من الماء عند درجة الحرارة هذه في تجمّده دون أن يصبح أبرد. وبالمثل، يمكن أن يتحوّل الماء والجليد إلى بخار أو العكس من خلال التبخر، والتكثّف، والتسامي، والترسّب. يتطلب تحويل الماء إلى بخار إلى كمية حرارة، وهذه الحرارة تتحرر عندما يعود البخار إلى ماء. إن الغليان هو حالة خاصة من التبخر، حيث يحدث التبخر داخل جسم الماء ذاته. لكي يحدث الغليان، يجب أن يتساوى ضغط بخار الماء مع الضغط البيئي على الماء، والذي هو في العادة الضغط الجوي.

كيفية عمل المصابيح المتوهجة

ينتج المصباح المتوهج ضوءاً على شكل إشعاع حراري من فتيلة تنجستن ساخنة جدا. يعتمد الطيف الضوئي المنبعث من تلك الفتيلة على درجة حرارتها – كلما زادت حرارة الفتيلة، أصبح الضوء أكثر بياضا. تتبخر الذرات في الفتيلة أثناء العمل فتختفي الفتيلة تدريجيا. في النهاية تصبح الفتيلة رقيقة جدا حتى تنكسر. تعمل فتيلة

التنجستن في المصباح العادي عند درجة حرارة 2500°C لأنها ستحترق بشكل أسرع عند درجات حرارة أعلى. إن خفض درجة حرارة التشغيل، كما يحدث في المصابيح طويلة العمر، يزيد من عمر الفتيلة على حساب درجة حرارة اللون وكفاءة الطاقة. على النقيض من ذلك، إضافة غاز هالوجين لإعادة تدوير ذرات التنجستن في الواقع تزيد من عمر الفتيلة وتحسّن كلاً من درجة حرارة لونها وكفاءة طاقتها.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون ستيفان – بولتزمان: قدرة إشعاع جسم تتناسب مع حاصل ضرب انبعاثيته في الأس الرابع لدرجة حرارته في مساحة سطحه، أو (١,٣,٧)

القدرة المنبعثة = الانبعاثية × ثابت ستيفان – بولتزمان × درجة الحرارة^4 × مساحة السطح

تحقق من فهمك – الإجابات

٧-١ موقد الخشب

١. لا، ستظل طاقته الحرارية ثابتة.

لماذا: حينما تسقط الكرة فإن طاقة جذبها الكامنة ستتحوّل لطاقة حركية. ولكن كلتا الطاقتين تُمكّن الكرة من القيام بشغل فهما ليستا مشملتين في طاقتها الحرارية.

٢. في بادئ الأمر ستواجهان قوى تجاذب. لكن عندما تقتربان من بعضهما أكثر، تصبح القوى تنافرية وترتدان عن بعضهما. حينما تنفصلان بعد ذلك فإن القوى تصبح تجاذبية مرة أخرى.

لماذا: حينما تقترب ذرتا النيتروجين من بعضهما، فإنهما تواجهان قوى تجاذب وتبدأ رابطة كيميائية بالتكوّن بينهما. تتسارع الذرتان نحو بعضهما، محولتين الطاقة الكيميائية الكامنة لطاقة حركية. ولكن عندما تكونان قريبتين جدا من بعضهما، فإن القوى تصبح تنافرية وترتدان من على بعضهما. تتحرك الذرتان بعيدا عن بعضهما وتصبح القوى تجاذبية مرة أخرى، لكن طاقتهما الحركية تكسر الرابطة فتنفصلان عن بعضهما للأبد.

٣. من يدك الأسخن إلى مكعب الجليد الأبرد.

لماذا: تتدفق الحرارة طبيعيا من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد. بما أن مكعب الجليد أبرد من يدك، فإن الحرارة تتدفق من يدك إلى داخل مكعب الجليد. بما أن يدك تفقد طاقة حرارية، فإن درجة حرارتها تهبط وتشعر بالبرد. مع أنه من المغري أن تفكر بأن البرد هو شيء يتدفق من مكعب الجليد، إلا أن الشيء الوحيد الذي يتحرك في الحقيقة هو الحرارة. مُكعبات الجليد هي ماصات رائعة للحرارة وتبرد مشروباتنا بخفض طاقاتها الحرارية.

٤. نعم، تتدفق الطاقة الحرارية من المناشف الساخنة، من خلال البلاستيك، إلى العضلة.

لماذا: يعمل الورق البلاستيكي كمبدّل للحرارة، فيسمح للحرارة بأن تتدفق من المناشف الساخنة إلى العضلة الأبرد لكنها تمنع حركة الماء الساخن نفسه.

٥. الموصلية الحرارية للمقبض.

لماذا: بعض المقابض مصنوعة من البلاستيك أو الحديد المقاوم للصدأ (الفولاذ الصامد)، والتي هي موصلات رديئة لكل من الكهرباء والحرارة. في الغالب تظل هذه المقابض باردة، إلا إذا قامت الغازات الساخنة من الموقد بتسخينها مباشرة. بعض المقابض الأخرى مصنوعة من الألومينيوم، أو النحاس، أو الحديد الصلب، والتي هي موصلات جيدة للكهرباء والحرارة. تصبح هذه المقابض في الغالب ساخنة بشكل لا تُطاق.

٦. يحدث حمل، بارتفاع الهواء الدافئ فوق الأرض مُستبدلاً بالهواء الأبرد من فوق سطح الماء. يُنشئ الهواء المتحرك من فوق الماء إلى فوق الأرض النسيم الهوائي.

لماذا: الرياح هي تيارات حمل عملاقة تحدث بسبب التسخين الشمسي. يرتفع الهواء فوق البقع الدافئة على سطح الأرض، وتهب الرياح السطحية نحو هذه البقع الدافئة لتحل محل الهواء المفقود.

٧. ينقل الإشعاع الحرارة من فتيلة المصباح إلى جلدك.

لماذا: يبعث المصباح الحراري كمية كبيرة من الإشعاع تحت الأحمر غير المرئي. بالرغم من أنك لا تستطيع رؤية هذا الإشعاع، إلا أنه يمكنك الشعور به على جلدك.

٨. في بادئ الأمر، يكون كل من الصينية والبسكويت ساخنين. تبدو الصينية أكثر حرارة لأن معدنها موصل جيد للحرارة ويمكنه أن يوصل حرارة أكثر لجلدك. لكن الصينية لها سعة حرارية صغيرة نسبيا فتهبط درجة حرارتها في هواء الغرفة البارد. البسكويت الرطب له سعة حرارية كبيرة، لذا فهو يبرد ببطء نسبياً.

لماذا: تبدو المعادن أسخن أو أبرد للمس مقارنة بالعوازل لأنها جيدة في نقل الحرارة في كلا الاتجاهين. لكن المواد التي تحتوي على ماء لها حرارات نوعية أكبر بكثير من المعادن وبالتالي تحافظ على درجة حرارتها بشكل أفضل.

٧-٢ الماء والبخار والجليد

١. عند سطح البحيرة.

لماذا: بما أن الجليد أقل كثافة من الماء، فإنه يطفو على سطح البحيرة. لذلك تتجمد البحيرة من أعلاها لأسفلها. تعيق طبقة الجليد العازلة على سطح البحيرة تجمد باقي الماء بحيث يصبح من غير المحتمل أن تتجمد البحيرة كلها. يسمح هذا السلوك للحيوانات أن تعيش في البحيرة أثناء فصل الشتاء. إذا غطس الجليد، فإن البحيرة ستتجمد كلياً وتصبح صلبة فتموت الحيوانات. لذا فإن ميل الجليد للطفو له تداعيات عظيمة بالنسبة للحياة في كوكبنا.

٢. يطلق الماء السائل كمية كبيرة من الحرارة عند تجمده وهذه الحرارة تساعد في

حماية الفواكه من التجمّد.

لماذا: تتجمد الفواكه عند درجات حرارة تحت 0°C بعض الشيء. حينما ينزع الهواء البارد الحرارة من الفاكهة المغطاة بالماء، فإن الماء يبدأ بالتجمّد. يتخلّص الماء السائل من كمية كبيرة من الحرارة أثناء تجمده ويمنع درجة حرارة الفاكهة من الهبوط لأقل من 0°C إلى أن يتحوّل الماء كليا إلى جليد. عند تلك النقطة، يعزل التوصيل الحراري الرديء للجليد الفاكهة ويبطئ فقد حرارتها للهواء البارد.

٣. درجات حرارتهما متساوية.

لماذا: تحتوي كلتا الكأسين على مزيج من الجليد والماء عند 0°C (32°F). إذا كان أي من الخليطين أبرد من ذلك، فإن ماءه سيتجمّد بسرعة لجليد، وإذا كان أي من الخليطين أسخن من ذلك، فإن جليده سيذوب بسرعة إلى ماء.

٤. يجب أن يعمل الموقد وقتا طويلا لتوفير الحرارة الكامنة لتبخر الماء الهائلة.

لماذا: يتطلب تحويل الماء الحار في الغلاية إلى بخار كمية حرارة هائلة. تفصل هذه الحرارة الجزيئات دون رفع درجة حرارتها. بما أن الموقد يوفّر كمية حرارة معينة فقط كل ثانية، فإنه قد يستغرق دقائق عديدة لتبخير الماء المغلي.

٥. حينما يبرد الهواء الرطب الدافئ من فمك، فإن رطوبته النسبية تزيد لأعلى من 100 ٪. يتكثّف بخار الماء ليكوّن ضباباً خفيفاً من قطرات الماء.

لماذا: تؤثر التغيرات في درجة الحرارة على الرطوبة النسبية. بالرغم من أن الهواء الدافئ الذي يغادر رئتيك قد يحتوي على جزء كبير من بخار الماء، إلا أن رطوبته النسبية تزداد بشكل مفاجئ عندما يبرد. يتغلب التكثّف عند درجات الحرارة المنخفضة، فيتكثّف بخار الماء غير المرئي على هيئة ضباب خفيف من قطرات الماء المرئية.

٦. تتسامى كرات الاسفنيك.

لماذا: بالرغم من أن كرات الاسفنيك لا تذوب عند درجة حرارة الغرفة، إلا أنها تتسامى بسهولة. يصبح الهواء المحيط بالكرات متشبعاً بسرعة بجزيئات الاسفنيك الغازية ولهذا تكون رائحته قوية جدا.

٧. تتكثّف فقاعات البخار المرتفعة أثناء مرورها خلال ماء درجة حرارته أقل من درجة حرارة غليانه.

لماذا: يصل الماء في قاع الوعاء لدرجة حرارة غليانه أولا: فتبدأ فقاعات البخار بالارتفاع منه. لكن الماء القريب من سطح الوعاء ليس ساخنا بشكل كافٍ ليُبقي هذه الفقاعات. بدلا من ذلك، يتكثّف البخار داخل الفقاعات فتنهار تماما.

٨. تم تسخين الماء في كوبك تسخينا فائقاً معتدلاً وبإضافة مسحوق القهوة بدأت نواة الغليان.

لماذا: مثل الزجاج ذاته، كوب الخزف المصقول ليس له مواقع تنوّي دائمة لمساعدة تشكّل الفقاعات البذرية والغليان. أنت محظوظ. تم تسخين الماء تسخينا فائقا طفيفا فقط وعندما أثرت غليانه بإضافة المسحوق، فإنه غلي بلطف نسبيا وبرُد سريعا لدرجة حرارة غليانه الطبيعية. لو كان الماء قد سُخّن تسخينا فائقا شديدا، لكان من الممكن أن تكون محروقاً بشكل سيء الآن.

٧-٣ المصابيح المتوهجة

١. تستطيع هذه الأقمار الصناعية قياس توزيع الأطوال الموجية للإشعاع الحراري المنبعث من قطع متعددة من الأرض وتحديد درجات حرارتها.

لماذا: حتى الأجسام القريبة من درجة حرارة الغرفة تبعث إشعاعاً حرارياً، على الرغم من أن هذا الإشعاع كلياً تحت الأحمر. مع أن الأرض ليست في الحقيقة سوداء، إلا أن الضوء تحت الأحمر الذي تبعثه ما زال مؤشراً دقيقاً لدرجة حرارتها. يستطيع القمر الصناعي أن يدرك الشكل الصحيح للتوزيع ويحدد درجة الحرارة بدقة عالية.

٢. عندما يكون المعدن أصفر ساخناً فإنه يفقد حرارة بسرعة عن طريق الإشعاع. ولكن قدرته الإشعاعية تتناقص بشدة أثناء انخفاض درجة حرارته.

لماذا: بما أن قدرة الفولاذ الإشعاعية تتناسب مع الأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة، فحتى الانخفاض البسيط في درجة الحرارة تلك يمكنه أن يخفّض كثيراً السرعة التي يشع بها الطاقة الحرارية ويخفض درجة حرارته.

٣. حينما تسخّن قدر الماء، فإن الماء يتمدد أكثر من القدر. بما أن الماء لم يعد يستوعبه القدر فإنه يفيض.

لماذا: يتمدد كلا القدر والماء بزيادة درجة الحرارة. لكن للماء معامل تمدد حجمي أكبر من معامل القدر، فحجمه يزداد أكثر من حجم القدر.

٤. يساند المصباح الداخلي عملية إعادة تدوير التنجستن، بينما المصباح الخارجي ينشر الضوء ويحمي المصباح الداخلي.

لماذا: يجب أن يصبح المصباح الداخلي ساخنا بما يكفي لتفاعل غاز الهالوجين مع ذرات التنجستن وإعادة تدويرها على سطحه. المصباح الخارجي غير شفاف لتخفيض الوهج وضمان أن لا يمس أي شيء المصباح الداخلي الساخن.

دقق في أرقامك – الإجابات

٧-٢ المصابيح المتوهجة

١. حوالي 524W.

لماذا: يمكننا استخدام المعادلة (٧,٣,١) للحصول على القدرة الإشعاعية:

$$524W = 524J/s = 2m^2 .\ (310k)^4 .\ 10^{-8} J/(s \cdot m^2 \cdot K^4) \times 5.67 \cdot 0.5$$

هذه القدرة هي أكثر بكثير من القدرة الحرارية التي ينتجها جسمك حينما تقف بلا حراك. سوف تبرد بسرعة.

تمارين

١. يحوّل جسمك حالياً الطاقة الكيميائية الكامنة من الطعام لطاقة حرارية بمعدل حوالي 100J/s، أو 100W. إذا كانت الحرارة تتدفق من جسمك بمعدل 200W تقريبا، ماذا سيحدث لدرجة حرارة جسمك؟

٢. يمكنك استخدام خلّاط لسحق مكعبات الجليد، لكن إذا تركت الخلاط يعمل لفترة طويلة فإن الجليد سيذوب. ما هو الشيء الذي يوفّر الطاقة اللازمة لإذابة الجليد؟

٣. عندما تعجن خبزا، فإن العجين يصبح دافئا. من أين تأتي هذه الطاقة الحرارية؟

٤. تقوم بقذف كرة لداخل صندوق وتغلق غطاءه. تسمع ارتداد الكرة داخل الصندوق أثناء ما تتغير طاقة الكرة من طاقة جذب كامنة، إلى طاقة حركية، إلى طاقة كامنة مرنة، وهكذا. إذا انتظرت دقيقة أو دقيقتين، ماذا سيحدث لطاقة الكرة؟

٥. لماذا يُطبخ اللحم والخضروات بشكل أسرع بكثير عندما تكون أسياخ معدنية مغروزة فيها؟

٦. لماذا تسخّن مقلاة من الألمونيوم الطعام بشكل متساوٍ أكثر من مقلاة من الحديد المقاوم للصدأ عندما تطبخ الطعام فوق الموقد؟

٧. استخدم مفهوم الحمل لتفسير سبب احتراق الخشب بشكل أفضل عندما يُرفع فوق شبك بعيدا عن قاع المستوقد.

٨. وضح كيف يساهم الحمل في تشكيل لهب شمعة.

٩. عندما تمسك بعود ثقاب مشتعل بحيث يكون رأسه أكثر انخفاضا من العود، فإن اللهب يتحرك بسرعة لأعلى العود. لماذا؟

١٠. كثيراً ما يُعد تغليف الطعام في ورق قصدير الألمونيوم قبل طبخه بالقرب من عنصر التسخين الأحمر الساخن في الفرن الكهربائي فكرة جيدة. لماذا يُطبخ هذا الطعام المغلف بتساوٍ أكبر؟

١١. لماذا تكون المدافئ البخارية السوداء أفضل في تدفئة غرفة من المدافئ المطلية باللون الأبيض أو الفضي؟

١٢. يولّد المكوك الفضائي طاقة حرارية أثناء عمله في مداره الأرضي. كيف يمكنه التخلص من تلك الطاقة الحرارية كحرارة في بيئة خالية من الهواء؟

١٣. بعض معطرات الهواء هي مواد صلبة لها رائحة قوية. إذا تركت هذه المعطرات مكشوفة فإنها ستختفي ببطء. ماذا يحدث للمادة الصلبة؟

١٤. الخضروات المجمّدة سـ«تُجفف بالتجميد» إذا تُركت في هواء بارد وجاف. كيف يمكن لجزيئات الماء أن تغادر الخضروات المتجمدة؟

١٥. إذا أخرجت مكعبات جليد من حجرة التجميد (الفريزر) في الثلاجة بأيدي مبللة، فإن المكعبات في الغالب تتجمّد على أصابعك. كيف يمكن للجليد أن يجمّد الماء الذي على يديك؟ ألا يجب أن تذوب المكعبات بدلاً من ذلك؟

١٦. في يوم بارد قارص، يكون الثلج خفيفا ومفتتاً. هذا الثلج لا يبدأ بالذوبان فورا إذا جلبته إلى غرفة دافئة. لماذا؟

١٧. عندما تضع رغيف خبز في كيس بلاستيكي، فما زال هناك هواء حول الخبز. لماذا لا يجفّ الخبز في الكيس بنفس سرعة جفافه عندما لا يكون هناك كيس حوله؟

١٨. حتى في يوم شديد الرطوبة يمكن للهواء الساخن من مجفف شعرك أن يستخرج الرطوبة من شعرك. لماذا يمكن للهواء المسخَّن أن يجفف شعرك بينما الهواء المحيط بك لا يستطيع ذلك؟

١٩. إذا أضفت قليلا من الشاي الساخن لماء متجمّد عند 0°C، فإن الخليط سيكون عند درجة حرارة 0°C طالما ظلّ هناك بعض الجليد. أين ذهبت الطاقة الحرارية الإضافية للشاي؟

٢٠. إذا وضعت قنينة دافئة من مشروب في وعاء ماء مثلّج، فإن المشروب سيبرد لكن الماء المثلج لن يصبح أدفأ. أين تذهب الطاقة الحرارية للمشروب؟

٢١. لماذا يمكنك أن تضع قدراً معدنياً مليئاً بالماء على عنصر التسخين الأحمر الساخن في موقد كهربائي دون الخوف من إتلاف القدر؟

٢٢. لماذا يسخن وعاء ماء ويبدأ بالغليان بسرعة أكبر إذا قمت بتغطيته؟

٢٣. يساعد وضع غطاء بلاستيكي شفاف فوق مسبح على إبقاء الماء دافئا في الطقس الجاف. فسر ذلك.

٢٤. إذا حاولت طبخ خضروات في هواء درجة حرارته 100°C، فإن الطبخ سيأخذ وقتا طويلا. لكن إذا طبخت نفس الخضروات في بخار درجة حرارته 100°C، فإنها ستطبخ بسرعة. لماذا ينقل البخار كمية حرارة أكبر بكثير للخضروات؟

٢٥. لماذا يستغرق طبخ المعكرونة جيدا في الماء المغلي في مدينة دنفر (المدينة المرتفعة ميلا عن سطح البحر) وقتاً أطول مقارنة بمدينة نيويورك؟

٢٦. أنت تطفو خارج المحطة الفضائية عندما يقذف لك زميلك رائد الفضاء قنينة ماء معدني باردة. هي خارج ردائك الفضائي لكن تفتحها على أية حال. تبدأ القنينة

فورا بالغليان. لماذا؟

٢٧. تذوب جزيئات المادة المانعة للتجمد بسهولة في الماء. لماذا تمنع إضافة المادة المانعة للتجمد للماء في أنابيب تبريد محرك السيارة تجمد الماء في الشتاء وغليانه في الصيف؟

٢٨. عندما تكون درجة الحرارة في الخارج 2- °C (29°F) ، فإنه يمكنك إذابة الجليد في الطريق أمام منزلك برش ملح عليه. لكن إذا نفد من عندك الملح، فهل ينفع استخدام صودا الخَبز (بيكربونات الصوديوم)؟

٢٩. العطر الجيد هو عبارة عن خليط من الزيوت العطرية وله رائحة تتغير مع الزمن ودرجة حرارة الجلد. فسّر التغير التدريجي لرائحة العطر مع الزمن بدلالة التبخر.

٣٠. يفقد رصيف مغطى بالجليد جليده تدريجياً حتى عندما يظل الطقس باردا. أين يذهب الجليد؟

٣١. كيف يمكنك أن تقدّر درجة حرارة فحم متوهج في موقد؟

٣٢. يحترق المصباح عندما يسخن جزء صغير من فتيلته المترققة أكثر من اللازم ويتبخر. لماذا يصاحب هذا الحدث وهج ساطع لضوء أبيض مزرق؟

٣٣. إن أقوى دليل لنظرية الانفجار العظيم لنشوء الكون هو الإشعاع الحراري المنبعث من ذلك الانفجار. برُد هذا الإشعاع عبر السنين إلى 3K فقط وهو في معظمه الآن موجات ميكروويف. لماذا يجب أن يكون الإشعاع الحراري عند 3K في مدى المايكروويف؟

٣٤. لديك مصباح مكتب بمفتاح يخفت الضوء. يسمح لك الخافت بتعديل درجة حرارة وسطوع المصباح المتوهج من أحمر خافت جدا إلى أبيض مصفر متقد. كيف تعتمد كفاءة طاقة المصباح، أي كمية الضوء المرئي الذي ينتجه لكل وحدة قدرة مستهلكة، على عيار الخافت؟

٣٥. عندما تشغّل مصباحاً ثلاثي المستويات 50-100-150W عند عيار 50W، فإنه يبعث ضوءاً أبيض مصفراً. عندما تستخدم خافتاً لتشغيل مصباح 150 W اعتيادي بـ 50W فقط من القدرة الكهربائية، فإنه يبعث ضوءا برتقاليا. فسّر الاختلاف.

٣٦. يمكن للفلكيين أن يعرفوا درجة حرارة سطح نجم بعيد دون أن يزوروه. كيف يتم ذلك؟

٣٧. يمكن أن يدرس الطبيب الدورة الدموية للمريض بتصوير الضوء تحت الأحمر المنبعث من جلد المريض. النسيج ذو تدفق ضعيف للدم يكون بارداً نسبيا. ما هي التغيرات في الانبعاثات تحت الحمراء التي تشير لمثل تلك المواضع الباردة؟

٣٨. فتيلة المصباح المتوهج صغيرة جدا، إلا إنها تبعث ما يصل مقداره إلى 100W من الإشعاع الحراري. هذا تقريبا مقدار ما يبعثه جسمك بأكمله. ما الذي يُفسّر قوة الإشعاع الحراري للفتيلة؟

٣٩. لماذا تُقسّم الأرصفة الخرسانية لمربعات منفردة بدلا من أن تترك كأشرطة خرسانية متصلة؟

٤٠. إذا كنت تضع القضبان الحديدية لسكة قطار، فما هو تأثير الذي يمكن أن يحدثه التمدد الحراري على عملك؟

٤١. يمكن أن يُفتح برطمان يصعب فتحه بسهولة بعد أن يترك للحظة تحت ماء ساخن. فسّر ذلك.

٤٢. لماذا للجسور فجوات خاصة عند طرفيها لتسمح لها بتغيير طولها؟

مسائل

١. إذا كان جذع شجرة محترق جسما أسودا بمساحة سطح 0.25m ودرجة حرارة 800°C، ما مقدار القدرة التي يبعثها كإشعاع حراري؟

٢. عندما تنفخ هواء على جذع الشجرة المذكور في مسألة ١، فإن درجة حرارته ترتفع لـ 900°C. ما مقدار الإشعاع الحراري الذي يبعثه الآن؟ لماذا أحدث الارتفاع بمقدار 100°C اختلافاً كبيراً كهذا؟

٣. إذا كان للشمس انبعاثية مقدارها 1 ودرجة حرارة سطح مقدارها 6000K، فما مقدار القدرة التي يبعثها كل $1m^2$ من سطحها كإشعاع حراري؟

٤. طبق من الطعام الساخن له انبعاثية مقدارها ٠,٤ ويبعث 20W من الإشعاع الحراري. إذا غلفته بقصدير الألمونيوم، والذي له انبعاثية مقدارها 0.8، ما مقدار القدرة التي سيشعها؟

٥. تستخدم مركبة فضائية سطحاً أسود كبيراً لتبدد الحرارة الفائضة عن طريق الإشعاع. كيف تعتمد كمية الحرارة المتبددة بالإشعاع على مساحة ذلك السطح المشع؟ إذا تضاعفت مساحة السطح، فما مقدار الزيادة في كمية الحرارة التي يبعثها، إن وجدت؟

الفصل ٨

الديناميكا الحرارية

تتدفق الحرارة عادة من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأبرد، ولهذا تدفئ الشمس الساخنة جلدك حينما تجلس على شاطئ البحر، ولهذا يبرّد نسيم الشتاء البارد جلدك وأنت تتزلج لأسفل جبل. لكن ليس كل شي في الطبيعة يسمح للحرارة بالتدفق بلا فعّالية. يشمل عالمنا التقني العديد من الأجهزة التي تنقل الحرارة بشكل نشط من الأجسام الأبرد إلى الأجسام الأكثر سخونة أو تستخدم تدفق الحرارة للقيام بشغل مفيد. في هذا الفصل، سوف نفحص القوانين التي تحكم حركة الحرارة، وهو مجال في الفيزياء يُعرف بالديناميكا الحرارية.

تجربة: صناعة ضباب في قنينة

يحدث الضباب طبيعيا عندما يواجه الهواء الرطب انخفاضاً مفاجئاً في درجة الحرارة. لصناعة ضباب في قنينة، ستحتاج أن تقوم بنفس الشيء: تبريد الهواء الرطب بسرعة. في غرفة يكون كل ما فيها عند نفس درجة الحرارة فإن تبريد الهواء يبدو مستحيلا. لكن ذلك غير صحيح.

لصناعة ضباب في قنينة، احصل على قنينة مشروب صودا بلاستيكية نظيفة سعة 1 أو 2 لتر وضع عدة ملاعق من الماء فيها. أغلق القنينة بإحكام ورجّها لكي تساعد الماء على التبخر في الهواء. خلال دقيقة أو دقيقتين، ستصل الرطوبة النسبية في القنينة لـ 100 ٪ وستكون مستعدا للقيام بالتجربة.

ضع القنينة على جانبها على الأرضية ودُس عليها بحذائك. يجب أن تضغط عليها بقوة لإحداث انبعاج ملحوظ في القنينة، إلا أنك لا تريد أن تفجرها أو تكسر جوانبها. انتظر على ذلك الوضع لمدة 20 أو 30 ثانية. تتدفق الحرارة خارج القنينة ويستغرق ذلك وقتا. والآن ارفع قدمك بسرعة عن القنينة وأنر محتوياتها فوراً بضوء ساطع. من المفروض أن ترى ضباباً خفيفاً من قطرات ماء صغيرة. إن إطلاق الضغط فجأة يتسبب في هبوط درجة حرارة الهواء ويتشّكل ضباب في القنينة. تنبأ كيف سيؤثر تغيير الضغط أو الزمن على الضباب، ثم لاحظ النتائج. هل تحققت من تنبئك؟ ما الذي يمكن أن تقيسه حول تشكيل الضباب وخصائصه؟

إذا لم يتكوّن أي ضباب، على الرغم من ضغط قوي بحذائك وصبر كافٍ لترك الحرارة تتدفق من القنينة، فإنه يمكنك أن تساعد الضباب بالبدء بإلقاء عود ثقاب داخن داخل القنينة قبل غلقها. أنت تريد جسيمات دخان صغيرة كافية لمساعدة سحب القطرات على التكوّن، لكن ليس بما فيه الكفاية لحجب الضباب ذاته. إن القيام بهذه الخدعة لا يتطلب جهداً كبيراً بعد غلق القنينة، اضغطها بقوة وانتظر، ثم أطلق الضغط فجأة وابحث عن الضباب.

بإذن من لوي بلومفيلد

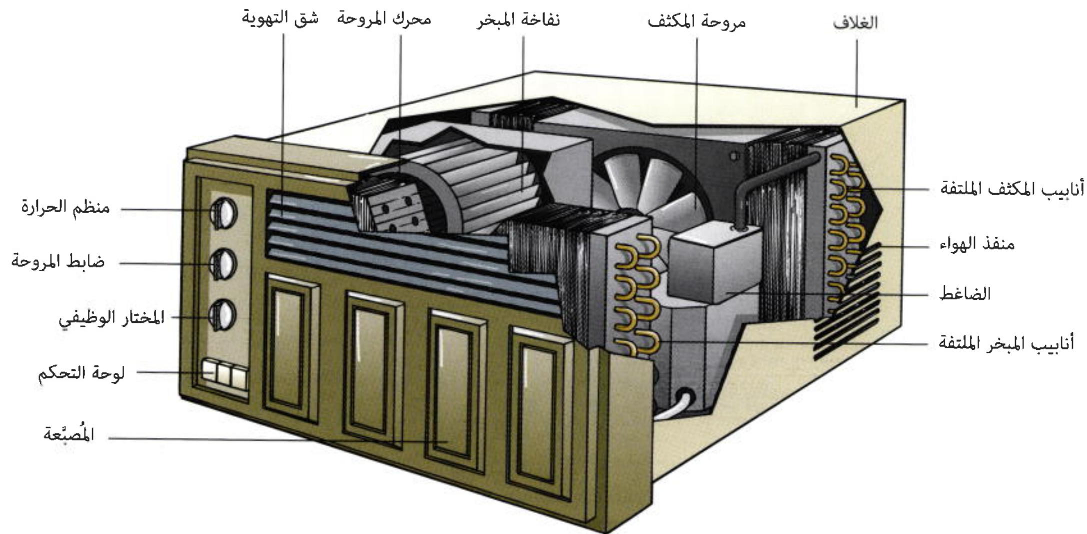




دليل الفصل

في هذا الفصل، سنفحص حركة الحرارة في آلتين نستخدمها في حياتنا اليومية: (١) مكيفات الهواء و(٢) السيارات. في قسم مكيفات الهواء، سوف ننظر للقوانين التي تحكم حركة الطاقة الحرارية - أي قوانين الديناميكا الحرارية - ونرى كيف تسمح هذه القوانين لمكيف الهواء باستخدام الطاقة الكهربائية المنتظمة لنقل الحرارة من هواء الغرفة الباردة لهواء الخارج الساخن. في قسم السيارات، سنتحرى الطرق التي يمكن بها استخدام الطاقة الحرارية للقيام بشغل ونرى كيف يتمكن المحرك من تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل حينما تتدفق الحرارة من الوقود المحترق الساخن إلى الهواء الخارجي البارد. لرؤية معلومات إضافية، تخطى للأمام لملخص الفصل في صفحة ٢٥١ .

المبادئ الموضحة في هاتين الآلتين موجودة أيضا في العديد من الأماكن الأخرى. تستخدم الثلاجات ومضخات الحرارة المنزلية طاقة منتظمة لنقل الحرارة من الأجسام الباردة للأجسام الساخنة بينما تستخدم المحركات البخارية ومناطيد الهواء الساخن التدفق الطبيعي للحرارة لجعل الأشياء تتحرك. عندما تفهم المفاهيم خلف مضخات الحرارة والمحركات الحرارية، فسترى أنها مألوفة جدا في العالم من حولنا.



٨-١ مكيفات الهواء

في يوم صيفي، مشكلتك ليست البقاء دافئا، بل البقاء باردا. بدلا من البحث عن شيء تحرقه في موقدك، فإنك تفتح مكيف الهواء. مكيف الهواء هو جهاز يبرّد هواء الغرفة بإزالة بعض من طاقته الحرارية. لكن مكيف الهواء لا يمكنه أن يجعل الطاقة الحرارية تختفي. بدلا من ذلك، فإنه ينقل الطاقة الحرارية من هواء الغرفة الأبرد للهواء الخارجي الأدفأ. بما أن مكيف الهواء ينقل الحرارة ضد اتجاه تدفقها الطبيعي، فإن مكيف الهواء هو «مضخة حرارة». كما أنه إيضاح تقليدي لقوانين الديناميكا الحرارية أثناء عملها.

أسئلة للتفكير

لماذا لا تتدفق الحرارة بشكل طبيعي من الجسم الأبرد إلى الجسم الأسخن؟ يزيل مكيف الهواء الطاقة الحرارية من هواء الغرفة، فلماذا يتطلب مكيف الهواء طاقة كهربائية لكي يعمل؟ أين تذهب تلك الطاقة الكهربائية؟ لماذا يوجد لمكيف الهواء دائما جزء داخلي وجزء خارجي؟ إذا وضعت مكيف الهواء المصنوع للنافذة في منتصف غرفة وفتحته، ماذا سيحدث لدرجة حرارة الغرفة؟

تجارب يمكن القيام بها

ألقِ نظرة على مكيف الهواء المصنوع للنافذة. إذا لم تستطع إيجاد واحد، فافحص الثلاجة بدلا من ذلك لأنها في الأساس مكيف هواء قوي يقوم بتبريد حجرة خزن الغذاء. حينما يعمل مكيف الهواء (أو الثلاجة)، تحسس الهواء الذي يخرج من فتحة الهواء الداخلية (أو داخل الثلاجة) وقارن درجة حرارته مع درجة حرارة الهواء الخارج من فتحة الهواء الخارجية (أو بالقرب من الملفات المعدنية على ظهر الثلاجة). في أي اتجاه تُحرك آلية التبريد الحرارة؟ إذا لم توجد هذه الآلية، في أي اتجاه ستتدفق الحرارة؟ أطفئ مكيف الهواء أو الثلاجة ولاحظ تدفق الحرارة الناتج. هل تحققت من تنبئك؟

تحريك الحرارة: الديناميكا الحرارية

في يوم صيفي شديد الحرارة، يصبح الهواء داخل منزلك ساخناً بشكل غير مريح. تدخل الحرارة منزلك من الخارج ولا تتوقف عن التدفق إلى أن يصبح الداخل ساخنا تماما كما هو في الخارج. يمكنك أن تجعل منزلك أكثر راحة بالتخلص من بعض طاقته الحرارية. لكن مع أننا قد رأينا سابقا طرقاً لإضافة طاقة حرارية لهواء الغرفة، فإننا لم نتعلم بعد كيف نزيلها. في الوقت الحالي، طريقة التبريد الوحيدة التي ناقشناها هي ملامسة جسم أبرد. ما لم يكن لديك منزل جليدي قريب منك، فستحتاج مخططاً آخر لإزالة الطاقة الحرارية. أنت تحتاج مكيف هواء.

ينقل مكيف الهواء الحرارة ضد اتجاه تدفقها الطبيعي. تتحرك الحرارة من الهواء الأبرد في منزلك للهواء الخارجي الأسخن، فيصبح منزلك أبرد بينما يصبح الهواء الخارجي أسخن. هناك ثمن لنقل الحرارة بهذه الكيفية. يتطلب مكيف الهواء طاقة منتظمة لكي يعمل ويستهلك في العادة كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية. مكيف الهواء هو نوع من مضخات الحرارة - أي أداة تستخدم طاقة منتظمة لنقل الحرارة من جسم أبرد إلى جسم أسخن، ضد الاتجاه الطبيعي للتدفق.

قبل معرفة كيفية ضخ مكيف الهواء للحرارة، فإننا يجب أولا أن نوضح أن الضخ مهم. هناك عدد من بدائل التبريد المعقولة التي يجب أن نأخذها بعين الاعتبار قبل أن نتجه لمكيف الهواء. ثلاثة من هذه البدائل هي:

١. جعل الحرارة تتدفق من منزلك لمنزل جارك.
٢. تدمير بعض من طاقة منزلك الحرارية.
٣. تحويل بعض من طاقة منزلك الحرارية لطاقة كهربائية.

لسوء الحظ، هذه البدائل الثلاثة لا يمكن القيام بها. ومع ذلك، سيكون من المفيد لنا فحص هذه البدائل عن قرب لأنه بذلك سنتعلّم أكثر عن القوانين التي تحكم حركة الطاقة الحرارية، قوانين الديناميكا الحرارية.
البديل الأول يثير قضية مثيرة. منزلك في حالة اتزان حراري مع الهواء الخارجي، بمعنى أنه لا تتدفق أي حرارة من أحدهما للآخر وأن كلاهما عند نفس درجة الحرارة. منزل جارك أيضا في اتزان حراري مع الهواء الخارجي. ماذا سيحدث إذا سمحت للحرارة بالتدفق بين منزلك ومنزل جارك؟ لا شيء. بما أن كلا المنزلين آنيا في وضع اتزان حراري مع الهواء الخارجي، فإنهما أيضا في وضع اتزان حراري مع بعضهما. كل الثلاثة (منزلك ومنزل جارك والهواء الخارجي) عند نفس درجة الحرارة.

هذه الملاحظة هي مثال للقانون الصفري للديناميكا الحرارية، والذي ينص على أن الجسمين اللذين في وضع اتزان حراري مع جسم ثالث هما أيضا في وضع اتزان حراري مع بعضهما. هذا القانون الذي يبدو بديهيا هو قاعدة لنظام درجات حرارة ذي معنى. إذا كان لديك غرفة مليئة بأجسام عند درجة حرارة 35°C (95°F) وبعضها كان في وضع اتزان حراري مع آخرين بينما آخرون لم يكونوا كذلك، فإن «كونها عند 35°C» لن يعني الكثير. ولكن، كل جسم له درجة حرارة 35°C هو في وضع اتزان حراري مع كل جسم آخر درجة حرارته 35°C. يُلاحظ أن القانون الصفري هو صحيح في الطبيعة لذا فإن لدرجة الحرارة معنى. وبما أن منزل جارك هو ساخن تماما مثل منزلك، فيمكن لجيرانك أن يرتاحوا لأنك لن تقوم بإرسال أي حرارة إضافية لهم.

القانون الصفري للديناميكا الحرارية

الجسمان اللذان في وضع اتزان حراري مع جسم ثالث يكونان أيضا في وضع اتزان حراري مع بعضهما.

يبدو البديل الثاني غير محتمل من البداية. لقد عرفنا منذ الفصل الأول أن الطاقة متميزة، أي أنها كمية محفوظة. لا يمكنك أن تبرّد منزلك بتدمير الطاقة الحرارية لأن الطاقة لا يمكن أن تدمّر. لإزالة الطاقة الحرارية، يجب أن تحوّلها لشكل آخر أو تنقلها لمكان آخر.

هذا المفهوم لحفظ الطاقة هو أساس القانون الأول للديناميكا الحرارية، والذي ينص على أن التغير في الطاقة الداخلية لجسم ساكن مساوٍ للحرارة المنقولة لداخل ذلك الجسم مطروحا منها الشغل الذي يبذله ذلك الجسم على البيئة المحيطة به. الطاقة

الداخلية للجسم هي مجموع طاقته الحرارية وأي طاقة كامنة إضافية مختزنة بالكامل داخل الجسم. ينص هذا القانون على أن الحرارة المضافة للجسم تزيد من طاقته الداخلية بينما الشغل المبذول من قبل الجسم يقلل من طاقته الداخلية. بعبارة أخرى، بما أن الطاقة محفوظة، فإن الطريقة الوحيدة التي يمكن لطاقة الجسم الداخلية أن تتغير هي بتحويل الطاقة كحرارة أو شغل. يمكن كتابة القانون الأول للديناميكا الحرارية كمعادلة لفظية:

التغير في الطاقة الداخلية للجسم = كمية الحرارة المضافة للجسم - الشغل المبذول من قبل الجسم (١،١،٨)

ورمزيا:

$$\Delta U = Q - W$$

وبلغة الحياة اليومية:

يمكنك إضافة طاقة لكرة كحرارة بتسخينها أو كشغل بضغطها.

القانون الأول لديناميكا الحرارية

التغيّر في الطاقة الداخلية لجسم ساكن يساوي كمية الحرارة المنقولة لداخل ذلك الجسم مطروحا منها الشغل الذي يبذله ذلك الجسم على بيئته المحيطة.

تحقق من فهمك # ١: إثارة المشاكل

(للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

إذا وضعت ماء باردا في خلّاط وخلطته بسرعة لعدة دقائق، فإن الماء سيصبح دافئا. من أين تأتي الطاقة الحرارية الإضافية؟

دقق في أرقامك # ١: أنت القوي

(للإجابة، انظر صفحة ٢٥٣)

قمت بتحريك دراجة الرياضة بثبات لمدة 20 دقيقة بقدرة 200Watt. ما مقدار القدرة الحرارية التي تبعثها الدراجة للغرفة؟

الفوضى، والانتروبي (العشوائية)، والقانون الثاني

يبدو البديل الثالث مبشّراً أكثر من البديلين الأولين. يبدو وكأنه يجب أن تكون قادرا على تحويل الطاقة الحرارية لكهرباء (أو شكل منتظم آخر من الطاقة). يمكنك عندها إعادة بيعها لشركة الكهرباء وتحصل على رصيد في فاتورتك. ألن يكون ذلك رائعا؟

لكن هناك مشكلة. الطاقة المنتظمة والطاقة الحرارية ليستا متكافئتين. يمكنك بسهولة تحويل الطاقة المنتظمة لطاقة حرارية لكن العكس أصعب كثيراً. على سبيل المثال، يمكنك حرق جذع شجرة لتحويل طاقته الكيميائية الكامنة لطاقة حرارية، لكنك ستجد صعوبة في تحويل تلك الطاقة الحرارية وإعادتها لطاقة كيميائية كامنة لإعادة تكوين الجذع.
قوانين الحركة الأساسية صامتة في هذه القضية. لا يعني أن الدخان ليس له طاقة لإعادة تكوين الجذع. لكن جسيمات الدخان المنفردة يجب أن تساهم بطاقاتها الحرارية سوية لتقوم بعملية إعادة التكوين، وهذا حدث غير محتمل بتاتا. يجب على الجسيمات جميعها أن تتحرك سوية بالطرق الصحيحة لإعادة الغازات المحترقة إلى خشب وأكسجين، وهذه صدفة مدهشة والتي ببساطة لا تحدث أبدا. بالمثل، جميع جسيمات الهواء في منزلك يجب أن تعمل سوية لتحويل طاقتها الحرارية لكهرباء. بما أن هذا السلوك المترابط هو غير محتمل للغاية، فأنت لن تقوم ببيع كهرباء لشركة الكهرباء في أي وقت قريب.
بمجرد أن تتبعثر الطاقة عشوائيا على جسيمات الهواء المنفردة، فإنك لا تستطيع تجميع تلك الطاقة مرة أخرى. إن تكوين فوضى من الانتظام هو شيء سهل، ولكن إعادة الانتظام من الفوضى مستحيل تقريباً. نتيجة لذلك، النظم التي تبدأ بمقدار معيّن من الانتظام تصبح تدريجيا فوضوية أكثر وأكثر، وليس العكس على الإطلاق. أفضل ما يمكن أن تحدثه تلك النظم

أن تبقى على حالتها لفترة من الزمن بحيث لا تتغير فوضاها. من هذه الملاحظات، يمكننا القول بأن الفوضى في نظام معزول لا تتناقص أبدا.

هذه الفكرة بأن الفوضى لا تتناقص أبدا هي إحدى المفاهيم الرئيسية للفيزياء الحرارية. حتى أنه يوجد مقياس رسمي لمقدار الفوضى الكلية في الجسم: الانتروبي. تساهم جميع الفوضى في انتروبي الجسم، بما في ذلك طاقته الحرارية وعيوب تركيبه. فكسر نافذة أو تسخينها كلاهما يزيدان من الانتروبي الخاص بها. بالرغم من أنه يبدو أن هناك تشابهاً بين الانتروبي والطاقة، إلا أنه يجب أن لا تخلط بينهما. فالطاقة كمية محفوظة، بينما الانتروبي كمية يمكنها فعليا أن تزداد. من السهل تكوين المزيد من الانتروبي.

بسبب أن الفوضى لا تتناقص أبدا، فإن البديل الثالث للتبريد مستحيل. إن إعادة الطاقة الحرارية لمنزلك لطاقة كهربائية سوف تخفض فوضاه وتقلل الانتروبي الخاص به. لكن ملاحظاتنا حول الانتروبي ليست مكتملة بعد. هناك طريقة واحدة لتقليل انتروبي منزلك: يمكنك أن تصدّر ذلك الانتروبي لمكان آخر. في الحقيقة، أنت تُصدّر انتروبي في كل مرة تخرج فيها القمامة من منزلك، لكن هذا العمل أيضا يغيّر من محتويات منزلك. يمكنك أيضا أن تصدّر الانتروبي دون تعديل محتويات منزلك بنقل الحرارة لمكان آخر. تحمل الحرارة الفوضى والانتروبي معها، لذا فالتخلص من الحرارة يؤدي إلى التخلص من الانتروبي.

قاعدتنا حول عدم تناقص الانتروبي ضعُفت بإمكانية تبديل الحرارة والانتروبي بين الأجسام. قبل أن نجزم بأن جسم أو مجموعة من الأجسام لا يمكنها تخفيض الانتروبي الخاص بها، فإننا يجب أن نضمن أنها معزولة حراريا من بيئتها المحيطة بحيث لا يمكنها أن تصدّر الانتروبي الخاص بها. بأخذ ذلك في الاعتبار، فإن أقوى مقولة يمكن أن نطلقها بخصوص الانتروبي هي أن الانتروبي لمنظومة من الأجسام المعزولة حراريا لا يمكن أبدا أن يتناقص. هذه الملاحظة هي القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

القانون الثاني للديناميكا الحرارية

الانتروبي لمنظومة من الأجسام المعزولة حراريا لا يمكن أبدا أن يتناقص.

بسبب القانون الثاني، فإن الطريقة الوحيدة لتبريد منزلك هي تصدير طاقته الحرارية والانتروبي الخاص به لمكان آخر. سيكون مثل هذا النقل سهلا إذا كان لديك جسم بارد قريب لاستقبال الحرارة. لكن في عدم وجود جسم بارد، فيجب أن تستخدم مكيف هواء. مثل جميع المضخات الحرارية، فإن مكيف الهواء ينقل الحرارة والانتروبي بطريقة لا تتعارض أبدا مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، والانتروبي لكل منظومة من الأجسام المعزولة حراريا لا يتناقص أبدا. كما سنرى، يخفّض مكيف الهواء انتروبي منزلك لكنه يرفع الانتروبي للهواء الخارجي أكثر بكثير بحيث يزداد الانتروبي الإجمالي للعالم في الحقيقة.

هناك حدّ لمقدار الانتروبي الذي يمكن أن يزيله مكيف الهواء من منزلك. فحينما يُصدّر مكيف الهواء الطاقة الحرارية والانتروبي فإنه يخفّض درجة حرارة منزلك. من حيث المبدأ، ستقترب درجة حرارة منزلك بعد حين من الصفر المطلق، وأثناء ذلك سيقترب الانتروبي من الصفر. هذه العلاقة بين صفر درجة الحرارة وصفر الانتروبي هي القانون الثالث للديناميكا الحرارية، والذي ينص على أنه عندما تقترب درجة حرارة جسم من الصفر المطلق، فإن الانتروبي الخاص به يقترب من الصفر. إن القانون الثالث يعيّن الصفر المطلق على أنه الغاية التي تنتهي عندها الفوضى، لكن في النهاية القانون الثاني يجعل من المستحيل انتزاع جميع الفوضى من الجسم. بما أنه من المستحيل إدراك الصفر المطلق، فإن القانون الثالث يشير للاقتراب من الصفر المطلق وليس الوصول إليه.

القانون الثالث للديناميكا الحرارية

حينما تقترب درجة حرارة جسم من الصفر المطلق، فإن الانتروبي الخاص به يقترب من الصفر.

تحقق من فهمك # ٢: شيء بدون مقابل

(للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

حاول الناس على مدى القرون بناء آلات توفّر مخرجات طاقة منتظمة مفيدة لا نهائية دون أي مدخلات من الطاقة المنتظمة. من سوء الحظ، هذه الآلات ذات الحركة الدائمة تعارض قوانين الديناميكا الحرارية. إذا تم عزل مثل تلك الآلة حراريا، فأي قانون تعارضه؟ ماذا لو لم تكن معزولة حراريا؟

ضخ الحرارة ضد تدفقها الطبيعي

في حين لا يسمح القانون الثاني للديناميكا الحرارية لانتروبي نظام معزول حراريا بالانخفاض، إلا أنه يسمح للأجسام في ذلك النظام بإعادة توزيع انتروبيتها الفردية. يمكن لانتروبي أحد الأجسام أن يقل طالما الانتروبي لباقي النظام يزيد على الأقل بنفس المقدار. تسمح إعادة توزيع الانتروبي لجزء من النظام بأن يصبح أبرد إذا أصبح باقي النظام أسخن.
على سبيل المثال، افترض أن هناك بحيرة من الماء البارد خلف منزلك. تقوم بضخ ذلك الماء خلال حوض حمامك وتجعله يمتص الحرارة من هواء الغرفة. يصبح منزلك أبرد بينما تصبح البحيرة أدفأ. هذا الانتقال للحرارة من الهواء الساخن في منزلك إلى الماء البارد في البحيرة يحقق القانون الثاني للديناميكا الحرارية. الانتروبي للنظام المشترك – منزلك وبحيرة الماء – لا يتناقص. في الحقيقة، إنه يتزايد!

تحدث هذه الزيادة في الانتروبي لأن الحرارة تسبب فوضى أكبر للأجسام الباردة منها للأجسام الساخنة. كل جول من الحرارة المتدفقة من منزلك للبحيرة يُحدث فوضى أكبر في البحيرة مقارنة بما يُحدثه من انتظام في منزلك.

يتضمن تشبيه مفيد لهذا التأثير حفلتين مقامتين آنيا: حفلة شاي لجمعية رعاية الحدائق السنوية وحفلة عيد ميلاد طفل عمره أربع سنوات. تُمثل حفلة الشاي المنتظمة البحيرة الباردة بينما تُمثل حفلة عيد الميلاد غير المنتظمة منزلك الساخن. وجه الشبه لجعل الحرارة تتدفق من منزلك الساخن إلى البحيرة الباردة هو بمبادلة طفل حيوي ذي الأربع سنوات من حفلة عيد الميلاد غير المنتظمة بشخص هادئ في العقد التاسع من عمره من حفلة الشاي المنتظمة. هذا التبادل سيخفّض فوضى حفلة عيد الميلاد قليلا، لكنه سيزيد بشكل كبير فوضى حفلة الشاي. الحضور في كل من الحفلتين لن يتغيروا لكن الفوضى الكلية ستزيد.

عندما تتدفق الحرارة من منزلك إلى البحيرة، فإن الانتروبي الإجمالي يتزايد والقانون الثاني يتحقق. تحدث زيادة مماثلة في الانتروبي كلما تدفقت الحرارة من جسم ساخن إلى جسم بارد، ولهذا تتدفق الحرارة عادة في ذلك الاتجاه.

لكن مكيف الهواء يقوم بما يبدو أنه مستحيل: فهو ينقل الحرارة من جسم بارد، أي منزلك، إلى جسم ساخن، أي الهواء الخارجي. هذه الحرارة تتدفق في الاتجاه الخاطئ، والفوضى التي تُحدثها بالدخول للهواء الخارجي الساخن هي أقل من الفوضى التي تزيلها بالخروج من الهواء الداخلي البارد. ذلك مثل إعادة الطفل ذي الأربع سنوات الموجود في حفلة الشاي لحفلة عيد الميلاد بتبديله مع الكهل المحب للحديقة – تصبح حفلة عيد الميلاد أكثر فوضى بشكل طفيف بينما تُصبح حفلة الحديقة أكثر انتظاما بشكل كبير، بحيث تتناقص الفوضى الإجمالية للحفلتين بشكل كبير. وبالمثل، إذا لم يحدث شيء آخر عندما حرّك مكيف الهواء الحرارة من الهواء الداخلي البارد إلى الهواء الخارجي الساخن، فإن الانتروبي لمجموع النظامين سينخفض وسيتعارض ذلك مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية!

لكننا أغفلنا ميزة مهمة في عملية تشغيل مكيف الهواء: **الطاقة الكهربائية التي يستهلكها.** يحوّل مكيف الهواء هذه الطاقة المنتظمة لطاقة حرارية وينقلها كحرارة إضافية للهواء الخارجي (شكل ٨،١،١). بالقيام بذلك، يكوّن مكيف الهواء انتروبي إضافياً كافياً لضمان أن الانتروبي الإجمالي للنظام المشترك يتزايد. تَحقق القانون الثاني في نهاية الأمر.

إن مقدار الطاقة المنتظمة التي يستهلكها مكيف الهواء يعتمد على درجات الحرارة الداخلية والخارجية. إذا كانت درجتا الحرارة قريبتين من بعضهما، فإن انتقال الحرارة سيُخفّض الانتروبي قليلا فقط فلا يحتاج مكيف الهواء أن يحوّل الكثير من الطاقة المنتظمة لطاقة حرارية. لكن إذا كانت درجتا الحرارة متباعدتين، فإن مكيف الهواء يجب أن يكوّن الكثير من

الانتروبي الإضافي لتعويض الانتروبي المفقود في التحويل.

يُفسّر هذا المتطلب، أي أن لا يتناقص الانتروبي، لماذا يعمل مكيف الهواء بشكل أفضل عندما يُبرّد منزلك أقل ما يمكن. كلما زاد الفرق في درجة الحرارة بين الهواء الداخلي والهواء الخارجي، زاد مقدار الطاقة الكهربائية أو أي شكل آخر من الشغل الذي يجب على مكيف الهواء أن يستهلكه لنقل كل جول من الحرارة. بالنسبة لمكيف هواء مثالي ذي كفاءة عالية أو أي مضخة حرارة أخرى، فإن العلاقات بين الشغل المستهلك، والحرارة المزالة من الجسم البارد، والحرارة المضافة للجسم الساخن يمكن كتابتها كمعادلة لفظية: (٢،١،٨)

$$\text{الحرارة المزالة من الجسم البارد} = \text{الشغل المستهلك} \cdot \frac{\text{درجة الحرارة}_{\text{بارد}}}{\text{درجة الحرارة}_{\text{بارد}} - \text{درجة الحرارة}_{\text{ساخن}}}$$

$$\text{الحرارة المضافة لجسم ساخن} = \text{الحرارة المزالة من جسم بارد} + \text{الشغل المستهلك}$$

ورمزيا:

$$-Q_c = W \frac{T_c}{T_h + T_c}$$

$$Q_h = -Q_c + W$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما تقاربت درجتا الحرارة، كان من الأسهل تحريك الحرارة من البارد إلى الساخن.

يستقبل الجسم الساخن ليس فقط الحرارة المزالة من الجسم البارد، بل أيضا كمية من الحرارة مساوية للشغل المستهلك في عملية النقل. لاحظ أيضا أن الشغل المطلوب لإزالة الحرارة من منزلك يقترب من اللانهاية حينما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق؛ ولهذا فإن الصفر المطلق مستحيل الإدراك.

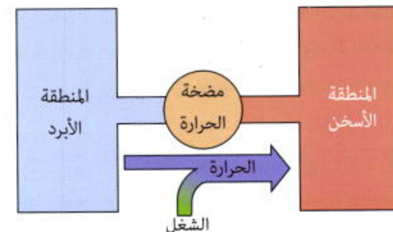
من المحزن أن مكيف الهواء العملي لا يصل أبدا للكفاءة المثالية، لذا فهو ينقل حرارة أقل من ما تعِد به معادلة (١،١،٨). علاوة على ذلك، تتسرب الحرارة عائدة لمنزلك خلال جدرانه بمعدل يتناسب تقريبا مع الفرق في درجة الحرارة. لا عجب أن فاتورتك الكهربائية ترتفع كثيراً عندما تُخفض منظم الحرارة بشكل كبير.

تحقق من فهمك # ٣: مضخات الحرارة في الطقس البارد (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

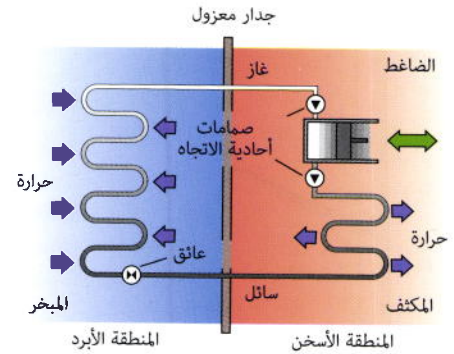
كثيراً ما يتم تدفئة المنازل الواقعة في مناخ معتدل بواسطة مضخات حرارة في فصل الشتاء. مضخات الحرارة المنزلية هي أساسا مكيفات هواء تعمل بشكل عكسي. تنتزع المضخات الحرارة من الهواء الخارجي البارد وتطلقه في الهواء الداخلي الدافئ. لماذا تكون مضخات الحرارة أكثر كفاءة في الطقس المعتدل، عندما لا يكون الهواء الخارجي باردا جدا؟

دقق في أرقامك # ٢: منزل دافئ بتكلفة بسيطة (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٣)

يتم تدفئة منزلك بمضخة حرارة ذات كفاءة مثالية تستخدم طاقة منتظمة لضخ الحرارة من الهواء الخارجي الأبرد إلى الهواء الداخلي الأدفأ. في يوم شتوي، كانت درجة الحرارة في الخارج 270K (-3°C أو 26°F) ودرجة الحرارة الداخلية هي 300K (27°C أو 80°F). لتوصيل 1000J من الحرارة للهواء الداخلي، ما مقدار الطاقة الكهربائية التي يجب أن تستهلكها مضخة الحرارة؟



شكل ١،١،٨: تقوم مضخة الحرارة بنقل الحرارة من منطقة أبرد إلى منطقة أسخن. بالقيام بذلك، فإنها تحوّل بعض الشغل (طاقة منتظمة) إلى حرارة (طاقة حرارية في المنطقة الأسخن). كلما زاد فرق درجات الحرارة بين المنطقتين، تطلب بذل شغل أكبر لنقل كل جول من الحرارة.



شكل ٢,١,٨: ينقل مكيف الهواء المعتاد الحرارة من الهواء الأبرد إلى الهواء الأسخن بتكثيف غاز إلى سائل في المنطقة الأسخن وتبخير السائل إلى غاز في المنطقة الأبرد. يوفّر الضاغط الطاقة المنتظمة المدخلة المطلوبة.

كيف يمكن لمكيف الهواء أن يبرد الهواء الداخلي

بعد تحديد أهداف مكيف الهواء، قد حان الوقت لكي ننظر كيف يمكن لمكيف هواء حقيقي أن يحققها. في معظم الحالات، يستخدم مكيف الهواء مائعاً لنقل الحرارة من الهواء الداخلي الأبرد إلى الهواء الخارجي الأسخن. يُعرف هذا السائل بمائع الشغل، وهذه المادة تمتص الحرارة من الهواء الداخلي وتطلق تلك الحرارة إلى الهواء الخارجي.

يتدفق مائع الشغل في مسار دائري خلال المكونات الرئيسية الثلاثة لمكيف الهواء: مبخّر، ومكثّف، وضاغط (شكل ٢,١,٨). يقع المبخّر في الداخل، حيث ينقل الحرارة من الهواء الداخلي إلى مائع الشغل (شكل ٣,١,٨). يقع المكثّف في الخارج، حيث ينقل الحرارة من مائع الشغل إلى الهواء الخارجي. ويقع الضاغط أيضا في الخارج، حيث يضغط مائع الشغل ويقوم بالشغل المطلوب لتحريك الحرارة ضد تدفقها الطبيعي. لرؤية كيف تضخ هذه الثلاث مكونات الحرارة خارج منزلك، دعنا ننظر إليها كلا على حدة.

سنبدأ بالمبخّر، وهو أنبوب معدني طويل مزيّن بزعانف معدنية رقيقة. يعتبر المبخّر مبدل حرارة يسمح للحرارة بالتدفق من الهواء الدافئ حوله إلى مائع الشغل البارد داخله. توفّر زعانفه مساحة سطح إضافية لتسهيل تدفق تلك الحرارة، وتقوم مروحة بنفخ الهواء الداخلي بسرعة عبر الزعانف بحيث تتحرك الحرارة بسرعة إلى مائع الشغل.
مطابقة لاسمه، يسمح المبخّر لمائع الشغل داخله بالتبخّر. ولهذا يصبح مائع الشغل باردا ويمتص كمية كبيرة من الحرارة. مثل أي مادة تبخير، يحتاج مائع الشغل السائل لحرارته الكامنة للتبخير لفصل جزيئاته عن بعضها البعض حتى يصبح غازا. يحصل مائع الشغل على تلك الحرارة الكامنة للتبخير من طاقته الحرارية، لذا تهبط درجة حرارته ثم تتدفق الحرارة لداخله خلال جدران المبخّر. في الوقت الذي يغادر فيه مائع الشغل الغازي المبخّر، يكون قد امتص مقداراً كبيراً من الطاقة الحرارية للهواء الداخلي ويحمل تلك الطاقة معه كطاقة كيميائية كامنة.

بإذن برايانت للتدفئة والتبريد



شكل ٣,١,٨: ينتزع المبخّر في وحدة تكييف الهواء المركزي الحرارة من الهواء الداخلي. تنقل هذه الحرارة للخارج، حيث يطلقها الضاغط والمكثّف إلى الهواء الخارجي.

لجعل مائع الشغل السائل يتبخر في المبخّر، فإن مكيف الهواء يخفّض ضغط المائع بشكل مفاجئ. تذكر من الفصل السابع أن تحولات الطور مثل التبخر تعتمد على معدل هبوط ومغادرة الجزيئات. عندما يتواجد كل من الطورين السائل والغازي، فإن الجزيئات تغادر السائل مراراً إلى الغاز وتهبط على السائل من الغاز. إذا تغلبت المغادرة، فإن السائل يتبخر ويصبح الغاز مستقرا. إذا تغلب الهبوط، فإن الغاز يتكثف ويصبح السائل مستقرا. وإذا توازنا مع بعضهما، فيمكن للسائل والغاز أن يتواجدا سوية في وضع اتزان طوري.

أثناء ما يتدفق مائع الشغل خلال أنبوب باتجاه المبخر، فإن ضغطه يكون مرتفعا والمائع مستقراً كسائل. عند هذا الضغط العالي، سيكون أي مائع شغل غازي كثيفا بحيث يتغلب الهبوط على المغادرة وسيتكثّف الغاز. لذا فإن الأنبوب يحمل فقط مائع شغل سائلا ذا ضغط عالٍ إلى المبخر.

لكن مباشرة قبل وصول مائع الشغل السائل للمبخر، فإنه يمر خلال قابض ضيق في الأنبوب ويهبط ضغطه بشكل كبير. إن مائع الشغل ذا الضغط المنخفض الناتج ليس مستقرا كسائل. عند الضغط المنخفض، يكون أي مائع شغل غازي مخففاً جدا بحيث تتغلب المغادرة على الهبوط فيتبخر السائل. لذا، بظهور مائع الشغل السائل ذي الضغط المنخفض من القابض وبصبه في المبخر، فإنه يتبخر بسرعة. سيستمر السائل بالتبخر بالرغم من أن درجة حرارته تنخفض أثناء ما يمتص حرارته الكامنة للتبخر. في الوقت الذي يخرج فيه مائع الشغل من المبخر، يكون قد تبخر كليا وقد امتص كمية كبيرة من الطاقة الحرارية من الهواء الداخلي. يغادر مائع الشغل المبخر كغاز بارد ذي ضغط منخفض ويسير خلال أنبوب باتجاه الضاغط.
قد انتهى نصف عمل مكيف الهواء: أزال الحرارة من الهواء الداخلي. لكن نصف العمل المتبقي هو أكثر تعقيدا: يجب أن يضيف حرارة للهواء الخارجي مع ضمان أن الانتروبي الكلي للنظام المشترك لا يتناقص. ففي النهاية، لا يمكن تجنب القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

تحقق من فهمك # ٤: التبريد عند مشواة الغاز (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

عندما يتبخر البروبان السائل إلى غاز في صهريج مشواة البروبان، فإن الصهريج الذي يحتوي على سائل البروبان يصبح أبرد. لماذا؟

كيف يدفئ المكيف الهواء الخارجي

إن تحقيق القانون الثاني هو وظيفة الضاغط. يستقبل الضاغط مائع الشغل الغازي ذا الضغط المنخفض من المبخّر، ويضغطه لكثافة أعلى بكثير، ويوصله للضاغط كغاز ذي ضغط عالٍ للمكثف. قد يستخدم الضاغط مكبساً وصمامات أحادية الاتجاه، مثل مضخة الماء في شكل (٣,٢,٥)، أو قد يستخدم آلية ضخ دائري. لكن بغض النظر عن كيفية عمله، فالنتيجة هي نفسها: يخضع مائع الشغل الغازي لزيادة كبيرة في الكثافة والضغط عندما يمر خلال الضاغط.

يتطلب ضغط الغاز شغلاً لأن الضاغط يجب أن يدفع الغاز للداخل أثناء تحريكه للداخل - قوة مضروبة في مسافة. بما أن الشغل ينقل الطاقة، فإن الضاغط يزيد طاقة الغاز. في الغالب يحصل مكيف الهواء على هذه الطاقة من محطة الكهرباء ويحوّلها إلى شغل ميكانيكي بواسطة محرك كهربائي.

وفق القانون الأول للديناميكا الحرارية، فإن هذا الشغل يزيد الطاقة الداخلية لمائع الشغل. إن الطريقة الوحيدة التي يمكن لمائع الشغل الغازي أن يختزن هذه الطاقة الإضافية هي كطاقة حرارية في جسيماته الفردية. تبدأ هذه الجسيمات بالحركة بسرعة أكبر وأكبر، بحيث يغادر مائع الشغل الغازي الضاغط بحرارة أكبر منها عند وصوله. لا يمكن تجنب تلك الزيادة في درجة الحرارة؛ فضغط مائع الشغل يرفع درجة حرارته بطريقة لا يمكن تجنبها.

عندها يتدفق مائع الشغل السائل ذو الضغط المرتفع إلى المكثف. مثل المبخر، فإن المكثف هو أنبوب طويل معدني له زعانف متصلة به. يعمل المكثف كمبدل حرارة وتوفّر زعانفه المعدنية مساحة سطح إضافية لتسريع تدفق الحرارة من مائع الشغل الأكثر حرارة داخله إلى الهواء الخارجي الأقل حرارة. قد يوجد أيضا مروحة لتحريك الهواء الخارجي بسرعة مرورا بالمكثف وتسريع نقل الحرارة.

كما يوحي اسمه، فإن المكثف يسمح لمائع الشغل الغازي داخله أن يتكثف لسائل. إن الضغط يحث هذا التكثف. حينما يتدفق مائع الشغل ذو الضغط المنخفض خلال أنبوب باتجاه الضاغط، يكون مستقراً كغاز. ولكن في مائع الشغل العالي الكثافة والعالي الضغط الذي يخرج من الضاغط، يتجاوز معدل الهبوط معدل المغادرة بشكل كبير ويتكثف الغاز.

مثل أي مادة مُكثفة، فإن مائع الشغل الغازي يطلق طاقته الحرارية الكامنة للتبخر عندما تترابط جزيئاته سوية فيصبح سائلاً. تصبح هذه الطاقة الحرارية الكامنة للتبخر طاقة حرارية في مائع الشغل، فتستمر درجة حرارته في الارتفاع وتتدفق الحرارة منه خلال جدران المكثف.

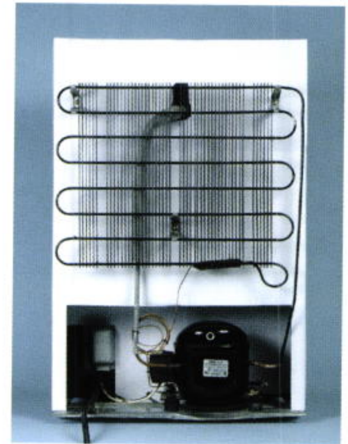
في الوقت الذي يغادر فيه مائع الشغل السائل المكثف، يكون قد حوّل كمية كبيرة من الطاقة الكيميائية الكامنة إلى طاقة حرارية وأطلق تلك الطاقة إلى الهواء الخارجي. يستقبل الهواء الخارجي على شكل حرارة ليس فقط الطاقة الحرارية المستخلصة من الهواء الداخلي، بل أيضا الطاقة الكهربائية المستهلكة من قبل الضاغط. يغادر مائع الشغل المكثف كسائل دافئ ذي ضغط عالٍ ويسير خلال أنبوب باتجاه المبخر.

النصف الثاني من عمل مكيف الهواء قد اكتمل الآن: لقد أطلق حرارة للهواء الخارجي وأثناء ذلك حوّل طاقة منتظمة إلى طاقة حرارية. من هنا، يعود مائع الشغل للمبخر ليبدأ الدورة مرة أخرى. يمر مائع الشغل بشكل متواصل حول الدائرة، باستخلاص حرارة من الهواء الداخلي في المبخر وإطلاقها إلى الهواء الخارجي في المكثف. يدفع الضاغط العملية بأكملها وبالتالي يحقق القانون الثاني للديناميكا الحرارية. تستخدم نفس التقنية لاستخلاص حرارة من الهواء داخل الثلاجة وإطلاق تلك الحرارة إلى هواء الغرفة (شكل ٤،١،٨).

قبل مغادرة موضوع مكيفات الهواء، يجب أن نأخذ لحظة للنظر في مائع الشغل ذاته. يجب أن يصبح هذا المائع غازا عند الضغط المنخفض وسائلا عند الضغط المرتفع، في معظم مدى درجات الحرارة التي يواجهها مكيف الهواء. عبر العقود، كانت موائع الشغل المعتادة هي الكلوروفلوروكربونات مثل العديد من أنواع الفريون. استبدلت هذه المركبات الأمونيا، وهي غاز سام يؤدي للتآكل أُستخدم في الثلاجات المبكرة.

تناسب الكلوروفلوروكربونات مكيفات الهواء جدا لأنها تتحوّل بسهولة من غاز إلى سائل وعكسيا في مدى واسع من درجات الحرارة. كما أنها أيضا خاملة كيميائيا ورخيصة الثمن. من سوء الحظ، تحتوي جزيئات الكلوروفلوروكربون على ذرات الكلورين، وعندما تُطلق إلى الهواء يمكنها أن تحمل معها ذرات الكلورين تلك للغلاف الجوي العلوي. هناك تُحفّز تدمير جزيئات الأوزون، والتي هي مكونات جوية ضرورية تقوم بامتصاص جزء من إشعاع الشمس فوق البنفسجي. مؤخرا، تم استبدال الكلوروفلوروكربونات بالهيدروفلوروكربونات الخالية من الكلورين كموائع شغل في معظم مكيفات الهواء. بالرغم من أن الهيدروفلوروكربونات ليست بنفس كفاءة الطاقة وليست خاملة كيميائيا كالمادة التي حلت محلها، إلا أنها تبدو أكثر أمانا للبيئة.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٤،١،٨: يظهر الضاغط (أسفل) والمكثف (أعلى) على ظهر هذه الثلاجة. يضغط الضاغط مائع الشغل حتى يصبح غازاً ساخناً كثيفاً ويوصله إلى المكثّف. هناك يتخلص من الحرارة إلى هواء الغرفة ويتكثّف إلى سائل. يتبخر مائع الشغل داخل الثلاجة باستخلاص الحرارة من الأطعمة.

تحقق من فهمك # ٥: تكييف الهواء أو تسخين الفضاء؟ (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٣)

ماذا سيحدث لمتوسط درجة حرارة غرفتك إذا وضعت وحدة تكييف نافذية في منتصف الغرفة وقمت بتشغيلها؟

باب خزانة الوقود
قالَب القُطارة
منزلقة السقف
الكوْل
فوّهة الغاسل
حاجب الريح
ماسحة حاجب الريح
هوائي
حاجز الاصطدام (رفرف العجلة)
العجلة
إطار العجلة
المحرك
المصبعة
رفرفة الطين
غطاء العجلة
ناقل الحركة
المصد
المصباح الأمامي



٢-٨ السيارات

لا شيء يرمز للحرية والاستقلال الشخصي أكثر من السيارة. بمفاتيحها في يديك، يمكنك أن تذهب تقريبا لأي مكان في أي لحظة تشاء. الآلية التي تجعل ذلك الانتقال اللحظي ممكنا هي محرك الاحتراق الداخلي. بالرغم من أن المحرك تم تطويره عبر السنين، إلا أن تصميمه الأساسي تغير قليلا منذ اختراعه قبل أكثر من قرن. يستخدم المحرك طاقة حرارية متحررة من وقود محترق للقيام بالشغل المطلوب لدفع السيارة إلى الأمام. إن كون الطاقة الحرارية قادرة على القيام بشغل هو أحد أعاجيب الفيزياء الحرارية ونقطة التركيز في هذا القسم.

أسئلة للتفكير

ما هي العوائق التي تقف في طريق استخدام الطاقة الحرارية للوقود المحترق لدفع سيارة؟ لماذا يتطلب جسمين، أحدهما ساخن والآخر بارد، لتحويل أي طاقة حرارية إلى شغل مفيد؟ ما هي الأجسام الساخنة والباردة التي لدى السيارة؟ لماذا للسيارة نظام تبريد للتخلص من الحرارة الفائضة بدلا من تحويلها جميعها لشغل مفيد؟

تجارب يمكن القيام بها

إن التطورات الحديثة في تقنية السيارات والمطالبات المتزايدة لأجهزة التحكّم بالتلوث جعلت السيارات معقدة جدا. مع هذا، خذ لحظة وانظر تحت غطاء محرك سيارتك أو سيارة صديقك: من المفترض أنك ستكون قادرا على تمييز المحرك ونظام دعمه الكهربائي. ستكون قادرا على عد أربعة أو أكثر من أسلاك شمعة الإشعال متجهة نحو أسطوانات المحرك. تحوّل هذه الأسطوانات الطاقة الحرارية من الوقود المحترق إلى شغل لدفع السيارة. لماذا يحتاج المحرك العديد من الأسطوانات، بدلا من الاعتماد على أسطوانة واحدة كبيرة؟

في مقدمة حجرة المحرك، ستجد المشعاع *(radiator)*. كيف يمكن لهذا الجهاز أن يستخلص الحرارة الفائضة من المحرك؟ هل تتدفق الحرارة طبيعيا إلى المشعاع ثم إلى الهواء الخارجي، أم أن هناك مضخة حرارة؟

استخدام الطاقة الحرارية: المحركات الحرارية

يتحوّل ضوء إشارة المرور إلى الأخضر فتضغط على دواسة التسارع. يهدر محرك سيارتك حينما يعمل، وفي لحظة أنت تتحرك في الطريق بسرعة ميل لكل دقيقة. تقلّ ضوضاء المحرك تدريجيا لتصل لخرخرة هادئة تختفي في ظل صوت المذياع والرياح المارة.

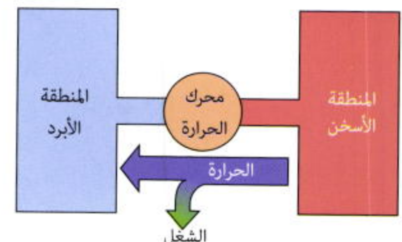
إن المحرك هو قلب السيارة، يدفع السيارة إلى الأمام عند إشارة المرور ويبقيها متحركة ضد قوى الجاذبية، والاحتكاك، ومقاومة الهواء. هو ليس ببساطة معجزة هندسية. بل إنه أيضا أعجوبة الفيزياء الحرارية لأنه يقوم بما يبدو أنها مهمة مستحيلة من تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة منتظمة. لكن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يمنع التحوّل المباشر للطاقة الحرارية إلى طاقة منتظمة، فكيف يمكن لمحرك السيارة أن يستخدم وقوداً محترقاً لدفع السيارة إلى الأمام؟
يتجنب محرك السيارة معارضة القانون الثاني بكونه محرك حراري - أي أداة تحوّل الطاقة الحرارية إلى طاقة منتظمة حينما تتدفق الحرارة من جسم ساخن إلى جسم بارد (شكل ١,٢,٨). مع أن الطاقة الحرارية في جسم واحد لا يمكن تحويلها إلى شغل، إلا أن هذا القيد لا ينطبق على نظام من جسمين عند درجتي حرارة مختلفتين. بما أن الحرارة المتدفقة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد تزيد من الانتروبي الإجمالي للنظام، فإن مقداراً قليلاً من الطاقة الحرارية يمكنها أن تتحوّل إلى شغل دون تقليل الانتروبي الإجمالي للنظام ودون انتهاك القانون الثاني للديناميكا الحرارية.
طريقة أخرى للنظر في المحرك الحراري هي من خلال مساهمات الجسمين. يوفّر الجسم الساخن الطاقة الحرارية التي تتحوّل إلى شغل. ويوفّر الجسم البارد الانتظام المطلوب للقيام بذلك التحويل. حينما يعمل المحرك الحراري، يفقد الجسم الساخن بعضا من طاقته الحرارية ويفقد الجسم البارد بعضا من انتظامه. لقد استخدمهما المحرك الحراري لإنتاج طاقة منتظمة. بما أن المحرك الحراري يحتاج كلاً من طاقة حرارية وانتظام، فإنه لا يمكنه أن يعمل إذا فُقد أي من الجسمين الساخن أو البارد.

في محرك السيارة، يكون الجسم الساخن هو الوقود المحترق والجسم البارد هو الهواء الخارجي. يتحوّل بعض الحرارة المارة من الوقود المحترق إلى الهواء الخارجي وتصبح الطاقة المنتظمة التي تدفع السيارة. لكن ما الذي يحُدّ كمية الطاقة الحرارية التي يمكن أن يحولها المحرك لطاقة منتظمة؟

للإجابة على ذلك السؤال، دعنا نفحص محرك سيارة مبسّطاً. سوف نتعامل مع الوقود المحترق والهواء الخارجي كنظام واحد معزول حراريا وننظر لما يحدث للانتروبي الكلي لهما عندما يعمل المحرك. بموجب القانون الثاني للديناميكا الحرارية، لا يمكن لهذا الانتروبي الكلي أن يتناقص حينما يحوّل المحرك بعضا من الطاقة الحرارية لطاقة منتظمة.

عندما تكون السيارة متوقفة عند إشارة المرور، فإن محركها لا يقوم بأي شغل، وببساطة تتدفق الحرارة من الوقود المحترق الساخن إلى الهواء الخارجي البارد. يتزايد الانتروبي الكلي للنظام لأن تلك الحرارة أكثر فوضى بالنسبة للهواء البارد الذي تدخل إليه منه للوقود المحترق الساخن الذي تغادره. في الحقيقة، يتزايد انتروبي النظام بشكل كبير لأن الوقود المحترق ساخن جدا مقارنة بالهواء الخارجي البارد.

هذه الزيادة في انتروبي النظام هي غير ضرورية ومبذرة. القانون الثاني للديناميكا الحرارية يتطلب فقط أن المحرك يضيف



شكل ١,٢,٨: يحوّل المحرك الحراري الحرارة (الطاقة الحرارية من المنطقة الأسخن) إلى شغل (طاقة منتظمة) حينما تتدفق الحرارة من المنطقة الأسخن إلى المنطقة الأبرد. كلما زاد الفرق في درجات الحرارة بين المنطقتين، زاد جزء الحرارة الذي يمكن تحويله لشغل.

انتروبي للهواء الخارجي البارد بنفس المقدار الذي يزيله من الوقود المحترق الساخن. بما أن القليل من الحرارة تؤدي لفوضى كبيرة للهواء البارد، فإن محرك السيارة يمكنه أن يوفّر مقداراً أقل من الحرارة للهواء الخارجي مقارنة بما يزيله من الوقود المحترق ويظل لا يسبب تناقصاً في الانتروبي الكلي للنظام. طالما أن المحرك يوفّر كمية حرارة للهواء الخارجي كافية للمحافظة على الانتروبي الكلي من التناقص، فلا يوجد أي مانع يمنعه من تحويل الحرارة المتبقية إلى طاقة منتظمة!

يبدأ هذا التحوّل بمجرد أن ترفع قدمك عن المكبح وتبدأ بالتسارع إلى الأمام. بدلا من تحويل جميع الطاقة الحرارية الموجودة في الوقود المحترق للهواء الخارجي، فإن سيارتك تستخلص بعضها وتستخدمها لتشغيل العجلات. يمكن لمحرك السيارة أن يحوّل طاقة حرارية إلى طاقة منتظمة طالما أنه يمرر كمية حرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد كافية لتحقيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

يصبح الامتثال بالقانون الثاني أسهل عندما يزداد الفرق في درجات الحرارة بين الجسمين. عندما يكون الفرق في درجات الحرارة كبيراً جدا، كما هو الحال في محرك السيارة، فيمكن لجزء كبير من الطاقة الحرارية الخارجة من الجسم الساخن أن يحوَّل إلى طاقة منتظمة - على الأقل نظريا. بالنسبة لمحرك سيارة أو محرك حراري آخر ذي كفاءة مثالية، فإن العلاقات بين الحرارة المزالة من الجسم الساخن، والحرارة المضافة للجسم البارد، والشغل المتوفر يمكن كتابتها كمعادلة لفظية: (١،٢،٨)

الشغل المتوفر = الحرارة المزالة من الجسم الساخن . (درجة الحرارة ساخن - درجة الحرارة بارد) / درجة الحرارة ساخن

الحرارة المضافة لجسم ساخن= الحرارة المزالة من جسم ساخن - الشغل المتوفر

رمزيا:

$$W = - Q_h \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$$Q_c = - Q_h - W$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما زاد الفرق في درجات الحرارة بين الساخن والبارد، زاد جزء الحرارة الذي يمكن أن تحوّله إلى شغل.

لسوء الحظ، يصعب في الغالب إدراك الحدود النظرية في الآلات الفعلية، وأفضل محركات السيارات تستخلص فقط نصف الطاقة المنتظمة تقريبا والمحددة بالمعادلة (١،٢،٨). ومع ذلك، فالحصول على ذلك المقدار هو عمل رائع ووقفة تقدير للعلماء والمهندسين الذين عملوا بجهد في السنوات الأخيرة لجعل محركات السيارات ذات أعلى كفاءة ممكنة في الطاقة.

تحقق من فهمك # ١: مضخات الحرارة والمحركات الحرارية (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

يستخدم مكيف الهواء الطاقة الكهربائية لجعل الهواء في منزلك أبرد من الهواء الخارجي. هل يمكنك استخدام هذا الفرق في درجات الحرارة لتشغيل محرك حراري وتوليد طاقة كهربائية؟

دقق في أرقامك #١: عودة للعصر البخاري (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٣)

يعمل قطار بمحرك بخاري مثالي. إذا كانت تعمل غلاية البخار عند 450K (177°C أو 350°F) وكانت درجة الحرارة الخارجية هي 300K (26°C و80°F)، ما مقدار الشغل الذي يمكن أن يحصل عليه المحرك البخاري بإزالة 1200J من الحرارة من الغلاية؟

محرك الاحتراق الداخلي

اخترع المهندس الألماني نيكولاس أوغست أوتو في عام ١٨٦٧م محرك الاحتراق الداخلي، وهو يقوم بحرق الوقود مباشرة في المحرك نفسه. يتم خلط البنزين والهواء وإشعالهما في حجرة مغلقة. يزيد الارتفاع الناتج في درجة الحرارة من ضغط الغاز ويسمح له بالقيام بشغل على سطح متحرك.

لاستخلاص شغل من الوقود، يجب على محرك الاحتراق الداخلي أن يؤدي أربع مهام بالترتيب:

١. يجب أن يُدخل مزيج الوقود والهواء إلى حجم مغلق.

٢. يجب أن يُشعل ذلك المزيج.

٣. يجب أن يسمح للغاز المحترق الساخن بالقيام بشغل على السيارة.

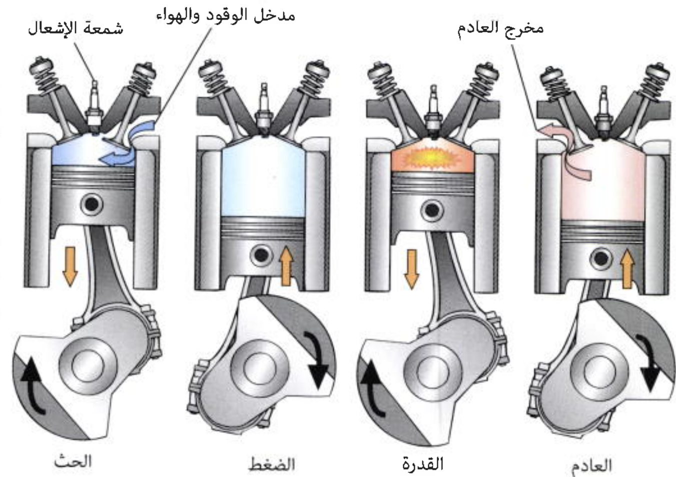
٤. يجب أن يتخلص من غاز العادم.

في المحرك القياسي ذي الأشواط الأربعة والحقن الوقودي والموجود في السيارات الحديثة التي تعمل بالبنزين، يحدث هذا التسلسل في الأحداث داخل أسطوانة مجوفة (شكل ٢,٢,٨). يسمى المحرك بمحرك «أربعة أشواط» لأنه يعمل في أربع خطوات أو أشواط: سحب، وضغط، وإشعال، وطرد. «الحقن الوقودي» يشير للتقنية المستخدمة لخلط الوقود والهواء حينما يُدخلان إلى الأسطوانة.

في العادة يكون لمحركات السيارات أربعة أو أكثر من هذه الأسطوانات. كل أسطوانة هي مصدر طاقة منفصل، مغلقة من طرف واحد ومجهزة بمكبس متحرك، وعدة صمامات، وحاقن وقود، وشمعة إشعال. ينزلق المكبس للأعلى وللأسفل في الأسطوانة، فيُقلّص أو يُكبّر التجويف الداخلي. تنفتح الصمّامات، الواقعة عند الطرف المغلق للأسطوانة، لإدخال الوقود والهواء إلى التجويف أو للسماح لغاز العادم المحترق بالخروج من التجويف. يقوم حاقن الوقود بإضافة وقود للهواء عندما يدخل إلى الأسطوانة. وتُشعل شمعة الإشعال، والواقعة أيضا عند الطرف المغلق للأسطوانة، مزيج الوقود والهواء لإطلاق طاقته الكيميائية الكامنة كطاقة حرارية.

يتم إدخال مزيج الوقود والهواء إلى كل أسطوانة أثناء شوط السحب. في هذا الشوط، يسحب المحرك المكبس بعيدا عن طرف الأسطوانة المغلق بحيث يتمدد تجويفها لتكوين فراغ جزئي. في نفس الوقت، تنفتح صمامات الإدخال للأسطوانة بحيث يستطيع الضغط الجوي أن يدفع هواء صافياً إلى الأسطوانة. يضيف حاقن الوقود في الأسطوانة سحابة من قطرات الوقود لهذا الهواء بحيث تمتلئ الأسطوانة بمزيج قابل للاشتعال من الوقود والهواء. بما أنه يتطلب شغلا لتحريك الهواء بعيدا عن الطريق وتكوين فراغ جزئي، فإن المحرك يقوم بشغل على الأسطوانة أثناء شوط السحب.

عند نهاية شوط السحب، تنغلق صمامات الإدخال لمنع مزيج الوقود والهواء من التدفق خارج الأسطوانة. الآن يبدأ شوط الضغط. يدفع المحرك المكبس باتجاه الطرف المغلق للأسطوانة بحيث يتقلص تجويفها ويصبح مزيج الوقود والهواء أكثر كثافة. بما أنه يتطلب شغلا للقيام بضغط الغاز، فإن المحرك يقوم بشغل على المزيج أثناء شوط الانضغاط. وفقا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، فإن هذا الشغل يزيد الطاقة الداخلية لمزيج الوقود والهواء. هذا المزيج الغازي لا يستطيع



شكل ٢,٢,٨: أسطوانة محرك ذي أربعة أشواط. أثناء شوط السحب، يدخل الوقود والهواء إلى الأسطوانة. شوط الانضغاط يضغط ذلك المزيج إلى حجم صغير. تُشعل شمعة الإشعال المزيج ويسمح شوط الإشعال للغاز الحار ببذل شغل على السيارة. أخيرا، يطرد شوط الطرد غاز العادم من الأسطوانة.

تخزين الطاقة المضافة على شكل طاقة كامنة، فترتفع طاقته الحرارية ويصبح أكثر سخونة. بما أن الزيادات في كل من كثافة الغاز ودرجة حرارته تزيد من ضغطه، فإن الضغط في الأسطوانة يرتفع بسرعة حينما يقترب المكبس من شمعة الإشعال.

في نهاية شوط الانضغاط، يضع المحرك نبضة كهربائية ذات فرق جهد عالٍ على شمعة الإشعال ويُشعل مزيج الوقود والهواء. يحترق المزيج بسرعة لإنتاج غاز محترق ساخن ذي ضغط مرتفع، والذي من ثم يقوم بشغل على السيارة أثناء شوط الإشعال للأسطوانة. في ذلك الشوط، يدفع الغاز المكبس بعيدا عن طرف الأسطوانة المغلق بحيث يتمدد تجويفها ويصبح الغاز المحترق أقل كثافة. بما أن الغاز الساخن يبذل قوة ضغط هائلة على المكبس أثناء حركته للخارج، فإنه يبذل شغلا على المكبس وفي النهاية يدفع السيارة. حينما يقوم بشغل، يتخلى الغاز المحترق عن الطاقة الحرارية ويبرد وفقا للقانون الأول للديناميكا الحرارية. تتناقص كثافته وضغطه أيضا. في نهاية شوط الإشعال، يكون غاز العادم قد برد بشكل كبير وضغطه أصبح بضعة أضعاف من الضغط الجوي فقط. لقد استخلصت الأسطوانة معظم الطاقة الكيميائية للوقود كشغل.

تتخلص الأسطوانة من غاز العادم أثناء شوط الطرد. في هذا الشوط، يدفع المحرك المكبس باتجاه الطرف المغلق للأسطوانة حينما تكون صمامات الإخراج في الأسطوانة مفتوحة. بما أن الغاز المحترق المحصور داخل الأسطوانة عند نهاية شوط الإشعال يكون أعلى بكثير من الضغط الجوي، فإنه يتسارع خارج الأسطوانة لحظة انفتاح صمامات الإخراج. تُنشئ هذه الاندفاعات المفاجئة للغاز المغادر للأسطوانة صوت ال«بوف - بوف - بوف» والذي هو صوت المحرك المتحرك. بدون وجود قناع على أنابيب العادم، فإن المحرك سيكون مرتفع الصوت وغير مريح.

إن مجرد فتح صمامات الإخراج يطلق معظم غاز العادم، لكن المتبقي ينضغط للخارج حينما يتحرك المكبس باتجاه طرف الأسطوانة المغلق. مرة أخرى يقوم المحرك بشغل على الأسطوانة حينما تضغط غاز العادم إلى الخارج. عند نهاية شوط الطرد، تكون الأسطوانة فارغة وتنغلق صمامات الإخراج. الأسطوانة جاهزة لتبدأ شوط سحب جديد.

تحقق من فهمك #٢: تُخرج أكثر مما تُدخل (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

لماذا يقوم الغاز المحترق بشغل أكبر على المكبس أثناء شوط الإشعال من الشغل الذي يقوم به المكبس على مزيج الوقود والهواء غير المحترق أثناء شوط الانضغاط؟

كفاءة المحرك

إن هدف محرك الاحتراق الداخلي هو استخلاص أكبر قدر ممكن من الشغل من كمية معينة من الوقود. من حيث المبدأ، يمكن تحويل كل الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود لشغل لأن كلتيهما طاقة منتظمة. لكنه من الصعب تحويل طاقة كيميائية كامنة إلى شغل مباشرة، فالمحرك يحرق الوقود بدلا من ذلك. هذه الخطوة مؤسفة، لأنه بحرق الوقود، يحوّل المحرك الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود مباشرة لطاقة حرارية ويُنتج الكثير من الانتروبي غير الضروري.

لكنه لم يُفقد كل شيءٍ. بما أن الوقود المحترق ساخن جدا، فإنه يمكن تحويل جزء جيد من طاقته الحرارية إلى طاقة منتظمة بنقل بعض من الحرارة المتدفقة من الوقود المحترق إلى الهواء الخارجي. كما أشرنا مسبقا، كلما كان الوقود المحترق أكثر حرارة والهواء الخارجي أكثر برودة، زادت كمية الطاقة المنتظمة التي يمكن أن يستخلصها المحرك. لإيصال الوقود لأقصى كفاءة، يحصل محرك الاحتراق الداخلي على أسخن غاز محترق ممكن، ويجعل ذلك الغاز يقوم بأكبر شغل ممكن على المكبس، ويطلق الغاز عند أبرد درجة حرارة ممكنة.

سيكون من الرائع إذا حصل أثناء شوط الإشعال أن تمدد الغاز المحترق وبرد إلى أن وصل درجة حرارة الهواء الخارجي. عندها سيغادر غاز العادم المحرك بنفس مقدار الطاقة الحرارية التي كانت لديه عند وصوله، وسيكون المحرك قد استخلص كل الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود كشغل. من المؤسف أن ذلك سيناقض القانون الثاني للديناميكا الحرارية بتحويل طاقة حرارية تماما إلى طاقة منتظمة. كما تشير معادلة (١,٢,٨)، فالمحرك الحراري العامل يضيف دائما بعضاً من الحرارة لجسمه البارد. في

هذه الحالة، يطلق المحرك الغاز المحترق قبل أن يبرد لدرجة حرارة الهواء الخارجي. ليس له خيار؛ يجب أن يكون عادم المحرك ساخنا!

لكن محرك الاحتراق الداخلي الحقيقي يهدر طاقة ويستخلص شغلاً أقل مما يسمح به القانون الثاني. على سبيل المثال، تتسرب بعض الحرارة من الغاز المحترق إلى جدران الأسطوانة وتُزال بنظام تبريد السيارة. هذه الحرارة المهدرة ليست متوفرة لإنتاج شغل. وبالمثل، يُهدر احتكاك الانزلاق في المحرك طاقة ميكانيكية، ويجعل من الضروري وجود نظام تشحيم مليء بالزيت. إجمالا، يحوّل محرك احتراق داخلي حقيقي فقط حوالي 20% إلى 30% من الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود إلى شغل.

تحقق من فهمك # ٣: تجنب الاحتراق (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

خلايا الوقود هي في الأساس بطاريات تحوّل الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود إلى طاقة كهربائية مباشرة، دون إحراق الوقود أولا. بالرغم من أن بناءها وتشغيلها أصعب، إلا أن خلايا الوقود أكثر كفاءة في الطاقة من محركات الاحتراق. فسر ذلك.

تحسين كفاءة المحرك

للحصول على أسخن غاز محترق ممكن، يجب على شوط الانضغاط أن يضغط مزيج الوقود والهواء إلى أصغر حجم ممكن. كلما ضغط المكبس المزيج بإحكام، ارتفعت كثافته، وضغطه، ودرجة حرارته قبل الإشعال، وأصبحت الغازات المحترقة أكثر سخونة بعد الإشعال. بما أن كفاءة أي محرك حراري تزداد بزيادة درجة حرارة جسمه الساخن وبما أن الغاز المحترق الساخن هو «الجسم الساخن» لمحرك السيارة، فإن درجة حرارته المرتفعة بعد الاحتراق يُعد شيئا حسنا، فكلما كانت أعلى كان ذلك أفضل.

يُقاس المدى الذي يتناقص فيه حجم الأسطوانة أثناء شوط الانضغاط بنسبة انضغاطه - حجمها عند بداية شوط الانضغاط مقسوما على حجمها عند نهاية شوط الانضغاط. كلما كبُرت نسبة الانضغاط، زادت حرارة الغاز المحترق وزادت كفاءة المحرك في الطاقة. في حين تتراوح نسب الانضغاط الطبيعية بين 1:8 و 1:12، إلا أنها قد تصل إلى 1:15 في محركات الانضغاط العالي.

من المؤسف أنه لا يمكن جعل نسبة الانضغاط كبيرة بشكل عشوائي. إذا ضغط المحرك مزيج الوقود والهواء بشكل كبير، فإن المزيج القابل للاشتعال سيصبح ساخنا جدا بحيث يشتعل وحده. هذا الاشتعال التلقائي نتيجة الزيادة في الانضغاط يسمى الاشتعال السبقي أو الدق. عندما تدقّ السيارة، يحترق البنزين قبل أن يكون المحرك جاهزا لاستخلاص شغل منه فيهدر الكثير من الطاقة.

هناك طريقتان لتقليل الدقّ. أولا: يمكنك مزج الوقود والهواء بشكل متساوٍ أكثر. في المزيج غير المتساوي، قد يكون هناك مناطق من الغاز تصبح أسخن أو أكثر عرضة للاشتعال من مناطق أخرى. يوفر نظام حقن الوقود المستخدم في جميع السيارات الحديثة مزجاً رائعاً ويسمح أيضا لكمبيوتر السيارة بتعديل مزيج الوقود والهواء ليحترق بالكامل ويقلل التلوث. ولذا، ما لم تكن السيارة غير منضبطة بتاتاً، فلن يكون هناك مجال كبير للتطوير بما يتعلق بتجانس المزيج.
ثانيا: يمكنك استخدام الوقود الأكثر ملاءمة. لا تشتعل جميع أنواع الوقود عند نفس درجة الحرارة، فيجب أن تختار الوقود القادر على تحمّل عملية الانضغاط في سيارتك دون الاشتعال تلقائيا. هذا هو بالضبط ما تقوم به عندما تشتري نوع البنزين المناسب. يشتعل البنزين العادي عند درجة حرارة منخفضة نسبيا وهو أكثر عُرضة للدقّ. يشتعل البنزين الممتاز عند درجة حرارة عالية نسبيا وهو أكثر مقاومة للدقّ.

إن أنواع الوقود الأصعب في الإشعال والأكثر مقاومة للدقّ خُصص لها «أرقام أوكتانية» أعلى. فالرقم الأوكتاني للبنزين العادي حوالي ٨٧ بينما البنزين الممتاز له رقم أوكتاني يساوي تقريباً 93 (جدول ١,٢,٨). اختيار الوقود المناسب هو ببساطة مسألة إيجاد البنزين ذي الرقم الأوكتاني الأقل والذي يمكن أن تستخدمه سيارتك دون دق مفرط. يعتبر قليل من الدق في الظروف الملحة مقبولاً جدا. إن معظم السيارات المضبطة بشكل جيد تعمل بشكل رائع باستخدام البنزين العادي. بما أنه فقط السيارات ذات الأداء العالي التي لها محركات ذات انضغاط مرتفع هي التي تحتاج بنزيناً ممتازاً، فإن وضع أي شيء غير بنزين عادي في السيارات العادية هو في الغالب تبذير في المال.

تحقق من فهمك # ٤: الممتاز هو السعر فقط (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

كجزء من حملة دعاياتها اللافتة للنظر، بدأت إحدى شركات الزيت بتسمية بنزينها ذي الرقم الأوكتاني 93 بـ «الإكسير الآلي». احتشد الناس عند المضخات لتعبئة حتى السيارات الاعتيادية بهذا البنزين. هل يجب أن تنضم لهم أو تضحك فقط؟

جدول ١,٢,٨: درجات حرارة الاشتعال التقريبية للأنواع القياسية الثلاثة للبنزين أثناء الانضغاط

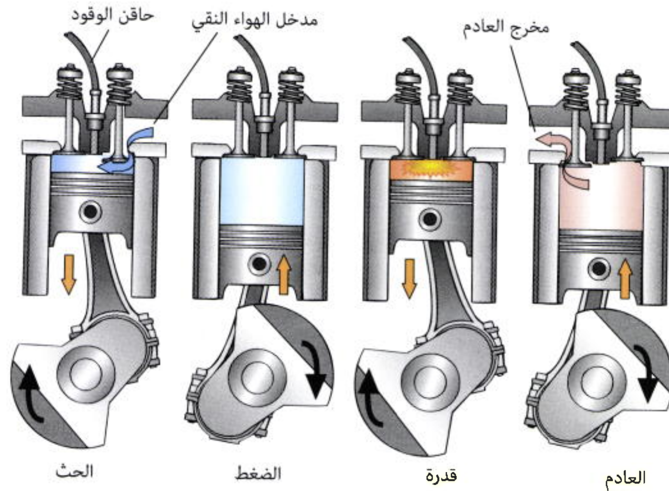
الرقم الأوكتاني	درجة حرارة الاشتعال التقريبية
87 (عادي)	750°C (1382°F)
90 (فوق عادي)	800°C (1472°F)
93 (ممتاز)	850°C (1562°F)

محركات الديزل والشاحنات التوربينية

بما أن الدقّ يضع حدا لنسبة الانضغاط، فإنه يضع أيضا حداً للكفاءة في محرك البنزين. ولكن تتفادى محركات الديزل مشكلة الدقّ بفصل الوقود عن الهواء أثناء شوط الانضغاط (شكل ٣,٢,٨). اخترع المهندس الألماني رودولف كريستيان كارل ديزل (١٨٥٨ – ١٩١٣م) محرك الديزل سنة ١٨٩٦م، والذي ليس له شمعة إشعال لإشعال الوقود. بدلا من ذلك، يضغط محرك الديزل الهواء الصافي بنسبة انضغاط عالية جدا تصل لحوالي ١:٢٠ ثم يحقن وقود الديزل مباشرة للأسطوانة عند بدء شوط الإشعال تماماً. يشتعل الوقود تلقائيا عند دخوله الهواء الساخن المضغوط.

بسبب ارتفاع نسبة انضغاطه، يحرق محرك الديزل وقوده عند درجة حرارة أعلى من محرك البنزين الاعتيادي وبذلك يمكن أن يكون أكثر كفاءة بالنسبة للطاقة. إن محرك الديزل له فعلياً «جسم ساخن» أسخن ويمكنه تحويل جزء أكبر من الحرارة إلى شغل. من المؤسف أن محرك الديزل أصعب في بدء تشغيله مقارنة بمحرك البنزين ويتطلب حقن وقود موقوتاً بعناية.
تدمج بعض محركات البنزين أو الديزل حاقن وقود مع شاحن توربيني. الشاحن التوربيني هو أساسا مروحة تقوم بضخ الهواء الخارجي لداخل الأسطوانة أثناء شوط السحب. بضغط المزيد من مزيج الوقود والهواء في الأسطوانة، فإن الشاحن التوربيني يزيد من قدرة المحرك الناتجة. يحرق المحرك مزيدا من الوقود في كل شوط إشعال ويتصرف مثل محرك أكبر. تُشغّل مروحة الشاحن التوربيني بواسطة الضغط في نظام عادم المحرك. يعمل جهاز مماثل تقريباً يسمى الشاحن الفائق بقدرة المحرك الناتجة مباشرة.

إن الجانب السلبي للشاحن التوربيني، غير كونه غالي الثمن وسريع التلف نوعا ما، هو أنه يستحث حدوث الدقّ. فحينما يضغط الهواء في الأسطوانة، فإنه يقوم بشغل على ذلك الهواء ويصبح الهواء ساخنا. بما أن مزيج الوقود والهواء يدخل المحرك وهو ساخن، فإنه يمكن أن يشتعل تلقائيا أثناء شوط الانضغاط. لتجنب حدوث الدق في سيارة مجهزة بشاحن توربيني، قد تحتاج لاستخدام بنزين ممتاز. بعض السيارات ذات الشاحنات التوربينية مجهزة بمبرد داخلي، وهو جهاز يزيل الحرارة من الهواء المار بالشاحن التوربيني. بتوفير هواء بارد عالي الكثافة للأسطوانات، فإن المبرد الداخلي يقلل من درجة حرارة الذروة في شوط الانضغاط ويتجنب الدقّ.



شـكل ٣،٢،٨: تحتوي أسـطوانة محـرك ديزل على هواء صـافٍ أثناء شـوط الانضغـاط. حينما يبذل المكبس شـغلا على الهواء، فإنه يصبح سـاخنا جدا. عند بداية شـوط الإشـعال، يُحقن وقود الديزل في الأسـطوانة. يشـتعل الوقود تلقائيـا، ويبذل الغاز المحترق الساخن شـغلا على المكبس والمحرك أثناء شوط الإشعال.

تحقق من فهمك # ٥: حرارة البخار (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

كيف يمكن لمحرك بخاري أن يكون أكثر كفاءة في الطاقة عندما يعمل على بخار درجة حرارته 325 °C مقارنة باستخدامه بخار درجة حرارته 300°C؟

محركات متعددة الأسطوانات

بما أن الغرض من المحرك هو استخلاص شغل من مزيج الوقود والهواء، فإنه من المهم أن تبذل كل أسطوانة شغلا أكثر مما تستهلكه. تتطلب ثلاثة من الأشواط أن يقوم المحرك بشغل على غازات متعددة، وفقط أحد هذه الأشواط يستخلص شغلاً من الغاز المحترق. أثناء شوط السحب، يبذل المحرك شغلاً لسحب مزيج الوقود والهواء إلى داخل الأسطوانة. أثناء شوط الانضغاط، يقوم المحرك بشغل في ضغط مزيج الوقود والهواء. أثناء شوط العادم، يبذل المحرك شغلاً في ضغط غاز العادم إلى خارج الأسطوانة. من حسن الحظ، الشغل المبذول على المحرك من قبل الغاز المحترق الساخن أثناء شوط الإشعال يعوّض بفائض الشغل الذي يبذله المحرك أثناء الأشواط الثلاثة الأخرى.

ومع ذلك، على المحرك أن يمنح الكثير من الطاقة إلى الأسطوانة قبل كل شوط إشعال. لتوفير تلك الطاقة الابتدائية، فإن معظم المحركات ذات الأربعة أشواط لها أربع أسطوانات أو أكثر (شكل ٤،٢،٨)، موقوتة بحيث يكون هناك دائما أسطوانة واحدة تمر خلال شوط الإشعال. إن الأسطوانة التي تكون في شوط إشعال توفّر الشغل المطلوب لمساعدة الأسطوانات الأخرى خلال الأشواط الثلاثة غير شوط الإشعال، ويتبقى هناك الكثير من الشغل لدفع السيارة نفسها.

حينما يتحرك المكبس ذهابا وإيابا، يحتاج المحرك لحركة دورانية لتدير عجلات السيارة. يحوّل المحرك الحركة الترددية لكل أسطوانة إلى حركة دورانية بربط ذلك المكبس بعمود مِرفقي بواسطة عمود توصيل. العمود المرفقي هو قضيب فولاذي سميك، متعلق بمحامل، له عدد من الامتدادات الشبيهة بالدواسات، واحد لكل أسطوانة. حينما يتحرك المكبس لخارج الأسطوانة أثناء شوط الإشعال، فإنه يدفع عمود التوصيل فيدفع عمود التوصيل دواسات عموده المرفقي. وهكذا ينتج عمود التوصيل عزماً دورانياً على العمود المرفقي. يدور العمود المرفقي في محامله وينقل هذا العزم لخارج المحرك لكي يُستخدم في دفع السيارة. لذا، في حين تبذل كل أسطوانة قوة ابتداء، فإن العمود المرفقي يستخدم تلك القوة لإنتاج عزم دوراني.

ينقل العمود المرفقي الدائر حول نفسه قدرته الدورانية إلى جهاز نقل حركة السيارة ومن هناك تنتقل القدرة إلى العجلات. إجمالا، يتحول جزء كبير من الحرارة المتدفقة خارج مزيج الوقود والهواء المحترق إلى شغل ويستخدم لإدارة

عجلات السيارة. بمساعدة الاحتكاك مع الأرضية المرصوفة، تدفع العجلات السيارة إلى الأمام وتسير في الطريق نـحو غايتك.

تحقق من فهمك #٦: بداية صعبة (للإجابة، انظر صفحة ٢٥٢)

تستخدم السيارات الحديثة محركا كهربائيا لبدء تحريك المحرك لكن السيارات القديمة كانت تُبدأ بعمود يدوي. لماذا كان من الصعب إدارة العمود؟

خاتمة الفصل الثامن

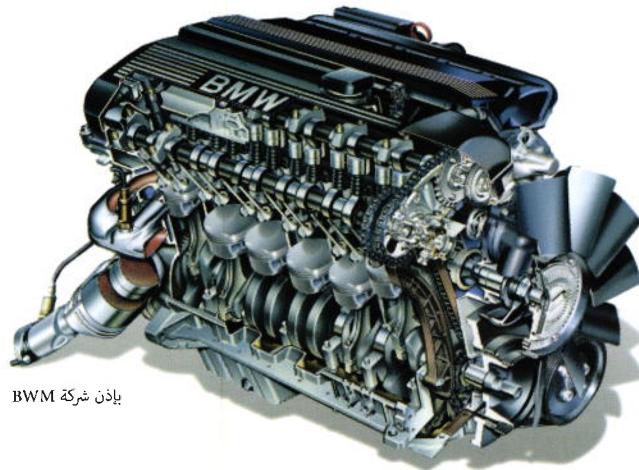
فحص هذا الفصل آلتين تتحكم بتدفق الحرارة لتحقيق مهمات صعبة. في مكيفات الهواء، تعلمنا كيف تستخدم مضخات الحرارة الطاقة المنتظمة لضخ الحرارة ضد تدفقها الطبيعي وشاهدنا أن الطريقة الوحيدة للتخلص من الطاقة الحرارية هي نقلها لشيء آخر. وفي السيارات، رأينا أن المحركات الحرارية تستطيع أن تأخذ بعضا من الحرارة المتدفقة من جسم ساخن إلى جسم بارد وتحوله إلى شغل مفيد. لقد فحصنا أيضا أدوار الجسمين الساخن والبارد في محرك حراري، ووجدنا أن الجسم الساخن يوفّر الطاقة اللازمة للقيام بالشغل بينما الجسم البارد يوفّر الانتظام الذي يجعل تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة منتظمة ممكنا.

تفسير: صناعة ضباب في قنينة

حتى عندما يكون كل شيء في الغرفة عند درجة حرارة واحدة، فإنه مازال يمكنك استخدام الديناميكا الحرارية لتبريد الهواء في القنينة لأقل من درجة حرارة الغرفة. عندما تخطو على القنينة بحذائك، فإنك تضغط الهواء داخلها وتقوم بشغل على ذلك الهواء. بما أن الهواء يمكنه أن يتسع لطاقة إضافية فقط كطاقة حرارية، فإن درجة حرارته ترتفع. يصبح الهواء في القنينة أسخن وتتدفق الحرارة من القنينة الأدفأ إلى الغرفة الأبرد. بعد نصف دقيقة أو نـحوها، تعود درجة حرارة الهواء في القنينة إلى درجة حرارة الغرفة.

عندما ترفع حذاءك عن القنينة، فإن الهواء داخلها يتمدد ويبذل شغلاً عليك. بما أن الهواء يمكنه أن يحصل على ذلك الشغل من طاقته الحرارية فقط، فإن درجة حرارته تنخفض. يصبح الهواء في القنينة أكثر برودة وتتجاوز رطوبته النسبية فجأة ١٠٠ ٪. نتيجة لذلك، تتكثف الرطوبة داخل القنينة على شكل قطرات ويصبح الهواء ضبابياً.

تساعد جسيمات الدخان على تكوّن القطرات بالعمل كبذور للقطرات. كما رأينا في الفصل السابع، لا يستطيع الماء أن يغلي دون فقاعات بذرية. وبالمثل، لا يمكن أن يتكثف البخار في الهواء دون قطرات بذرية. عندما تفشل القطرات البذرية في التكوّن تلقائيا، فإن الدخان يساعدها قليلاً.



بإذن شركة BWM

شـكل ٤،٢،٨: يُظهر هذا المنظر لمقطع محرك سـيارة BMW المكابس السـتة مرتبة في صف واحد. لقد تم اسـتبعاد الأسطوانات من الشكل.

ملخص الفصل

كيفية عمل مكيفات الهواء

إن مكيف الهواء يحرك الحرارة ضد اتجاه تدفقها الطبيعي، باستخدام مائع شغل يمر بشكل لا نهائي خلال مبخر، وضاغط، ومكثف. يتدفق مائع الشغل نحو المبخر كسائل مستقر ذي ضغط عال. قبل أن يُصب السائل إلى المبخر مباشرة، يمر هذا السائل خلال قابض ضيق في الأنبوب ويواجه انخفاضاً كبيراً في الضغط. بما أن مائع الشغل غير مستقر كسائل ذي ضغط منخفض، فإنه يتبخر بسرعة في المبخر وبالتالي يمتص قدراً كبيراً من الحرارة من الهواء الداخلي.

عندما يتدفق مائع الشغل إلى الضاغط كغاز مستقر ذي ضغط منخفض. يضغطه الضاغط ليصبح غازاً ساخناً ذا كثافة عالية وضغط مرتفع وينفخه إلى المكثف. بما أن مائع الشغل غير مستقر كغاز ذي ضغط مرتفع، فإنه يتكثف بسرعة في المكثف وبالتالي يطلق كمية كبيرة من الحرارة للهواء الخارجي. بعدها يعود مائع الشغل السائل الناتج باتجاه المبخر ليبدأ الدورة مرة أخرى.

لدفع هذه العملية، يستهلك الضاغط طاقة منتظمة وينقلها كحرارة للهواء الخارجي. بدون هذا الإدخال من الطاقة المنتظمة، لا يستطيع مكيف الهواء أن يُحرك الحرارة ضد اتجاه تدفقها الطبيعي.

كيفية عمل السيارات

يستخلص محرك السيارة شغلا من وقوده الكيميائي بإحراق ذلك الوقود داخل أسطواناته وجعل الغاز المحترق الناتج يبذل شغلا على المحرك. معظم المحركات لها أربع أسطوانات على الأقل، وكل واحدة منها تتطلب أربعة أشواط لاستخلاص شغل من الوقود. أثناء شوط السحب، يتحرك مكبس لخارج الأسطوانة ويسحب مزيجاً من الوقود والهواء إلى داخل التجويف الناتج. أثناء شوط الانضغاط، يتحرك المكبس لداخل الأسطوانة، فيضغط هذا المزيج من الوقود والهواء ليصل لكثافة وضغط ودرجة حرارة مرتفعة. عندما تُشعل شرارة كهربائية المزيج فيحترق ليكوّن غازاً محترقاً ساخناً جدا. أثناء شوط الإشعال، يتحرك المكبس مرة أخرى لخارج الأسطوانة أثناء ما يقوم الغاز الساخن ببذل شغل عليه. هذا الشغل هو ما يُشغّل السيارة. أخيرا، أثناء شوط العادم، يتحرك المكبس إلى داخل الأسطوانة ويضغط الغاز المحترق للخارج. ثم تبدأ الأسطوانة مرة أخرى بوقود وهواء جديد.

قوانين ومعادلات مهمة

١. القانون الصفري للديناميكا الحرارية: أي جسمين في وضع اتزان حراري مع جسم ثالث يكونان أيضا في وضع اتزان حراري مع بعضهما.

٢. القانون الأول للديناميكا الحرارية: التغيّر في الطاقة الداخلية لجسم ساكن يساوي كمية الحرارة المنقولة لداخل ذلك الجسم مطروحا منها الشغل الذي يبذله ذلك الجسم على بيئته المحيطة، أو

التغير في الطاقة الداخلية = كمية الحرارة المضافة – الشغل المبذول (٨,١,١)

٣. القانون الثاني للديناميكا الحرارية: الانتروبي لمنظومة من الأجسام معزولة حراريا لا يمكن أن يتناقص أبداً.

٤. القانون الثالث للديناميكا الحرارية: حينما تقترب درجة حرارة جسم من الصفر المطلق، فإن الانتروبي الخاص به يقترب من الصفر.

٥.كفاءة مضخة حرارية: الكفاءة المثالية لمضخة حرارية تعتمد على درجات حرارة أجسامها الساخنة والباردة: (٨,١,٢)

$$\text{الحرارة المزالة من الجسم البارد} = \text{الشغل المستهلك} \cdot \frac{\text{درجة الحرارة}_{\text{بارد}}}{\text{درجة الحرارة}_{\text{بارد}} - \text{درجة الحرارة}_{\text{ساخن}}}$$

الحرارة المضافة لجسم ساخن= الحرارة المزالة من جسم بارد + الشغل المستهلك

٦. كفاءة محرك حراري: الكفاءة المثالية لمحرك حراري تعتمد على درجات حرارة أجسامه الساخنة والباردة: (٨,٢,١)

$$\text{الشغل المتوفر} = \text{الحرارة المزالة من الجسم الساخن} \cdot \frac{\text{درجة الحرارة}_{\text{ساخن}} - \text{درجة الحرارة}_{\text{بارد}}}{\text{درجة الحرارة}_{\text{ساخن}}}$$

الحرارة المضافة لجسم ساخن= الحرارة المزالة من جسم ساخن - الشغل المتوفر

تحقق من فهمك – الإجابات

٨-١ مكيفات الهواء

١. تبذل شفرة الخلّاط شغلا على الماء، ويصبح هذا الشغل طاقة حرارية.

لماذا: ينص القانون الأول للديناميكا الحرارية على أن التغيّر في طاقة الماء الداخلية يساوي الحرارة المتدفقة إليه مطروحا منها الشغل الذي يبذله على البيئة المحيطة به. في هذه الحالة، تبذل البيئة المحيطة بالماء شغلاً عليه بتحريكه بحيث تزيد طاقته الداخلية. بما أن الماء لا يستطيع تخزين هذه الطاقة الداخلية الجديدة كطاقة كامنة، فإن الطاقة تصبح طاقة حرارية ويسخن الماء.

٢. تعارض الآلة ذات الحركة الدائمة والمعزولة حراريا القانون الأول، بينما غير المعزولة حراريا تعارض القانون الثاني.

لماذا: من الواضح أن الآلة ذات الحركة الدائمة والمعزولة حراريا تعارض جانب حفظ الطاقة في القانون الأول للديناميكا الحرارية. هذه الآلة المعزولة لا يمكنها ببساطة تصدير الطاقة إلى الأبد لأنها في نهاية الأمر ستنفد. إن آلة الحركة الدائمة غير المعزولة حراريا قد لا تعارض حفظ الطاقة لأنها يمكنها امتصاص طاقة حرارية من البيئة المحيطة بها. بدلا من ذلك، تعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية. هذه الآلة لا يمكنها امتصاص طاقة حرارية إلى الأبد وبعدها تصدرها كطاقة منتظمة. بقيامها بذلك، ستبدأ الآلة بعد حين بتقليل انتروبي الكون ومعارضة القانون الثاني. على قدر ما هو محزن، إلا أن الآلات الدائمة الحركة لا يمكن أن توجد.

٣. تتطلب مضخة الحرارة المزيد من الطاقة المنتظمة لضخ الحرارة من جسم بارد إلى جسم ساخن عندما يكون فرق درجة الحرارة بينهما كبيراً.

لماذا: تصبح مضخة الحرارة أقل كفاءة في ضخ الحرارة عندما تكون درجة حرارة مصدر الحرارة أكثر برودة من الجسم الذي تنتقل إليه الحرارة. كلما كان الخارج أبرد، تطلب المزيد من الطاقة المنتظمة لتحريك كل جول من الحرارة. في أيام البرودة القارصة، لا تستطيع مضخات الحرارة أن تحرك حرارة كافية لإبقاء المنزل دافئا، ولهذا فإن معظم مضخات الحرارة المنزلية لها أفران كهربائية أو غازية لمساعدتها أثناء الطقس البارد غير الاعتيادي.

٤. يحتاج البروبان السائل في الصهريج حرارة لكي يتبخر إلى غاز، وينتزع تلك الحرارة من البيئة المحيطة به.

لماذا: مثل ما هو الحال في مبخر مكيف الهواء، يمتص البروبان السائل المتبخر حرارة.

٥. في المتوسط، سيصبح هواء الغرفة أكثر دفئا.

لماذا: سيبدأ مكيف الهواء بضخ حرارة من مقدمته إلى مؤخرته. سيصبح الهواء أمام الوحدة أبرد، بينما الهواء خلف الوحدة سيصبح أسخن. بما أن الوحدة ستنقل حرارة أكثر للهواء الساخن مما تمتصها من الهواء البارد، فإنها ستزيد من كمية الطاقة الحرارية الكلية في الهواء. في المتوسط، ستصبح الغرفة أكثر دفئا.

٨-٢ السيارات

١. نعم.

لماذا: في الأساس، المحرك الحراري هو مضخة حرارية تعمل عكسيا. يستخدم مكيف الهواء (وهو مضخة حرارية) طاقة كهربائية منتظمة لضخ الحرارة من الهواء البارد في منزلك إلى الهواء الخارجي الساخن. سيستخدم المحرك الحراري الذي نناقشه تدفق الحرارة من الهواء الخارجي الساخن إلى الهواء البارد في منزلك لينتج طاقة كهربائية منتظمة.

٢. الضغط أكبر في الغاز المحترق منه في مزيج الوقود والهواء غير المحترق.

لماذا: مقدار الشغل المبذول على المكبس من قبل الغاز أو المبذول على الغاز من قبل المكبس يعتمد على الضغط داخل الأسطوانة. كلما ارتفع ذلك الضغط، زادت القوة إلى الخارج التي يواجهها المكبس وزاد الشغل المبذول عليه أثناء تحركه. إن الارتفاع المفاجئ في الضغط الذي يحدث عندما يحترق مزيج الوقود والهواء يفسّر لماذا يبذل الغاز المحترق الكثير من الشغل على المكبس أثناء تحركه إلى الخارج. ذلك الارتفاع في الضغط ينشأ جزئيا من الارتفاع في درجة الحرارة وجزئيا من تفكك جزيئات الوقود والأكسجين للعديد من الجزيئات الأصغر.

٣. بما أن خلايا الوقود لا تحوّل طاقة الوقود المنتظمة إلى طاقة حرارية، فلا يتحتم عليها أن تعمل مثل المحركات الحرارية. من حيث المبدأ، يمكنها أن تحوّل جميع الطاقة الكيميائية الكامنة للوقود إلى طاقة كهربائية، على عكس محركات الاحتراق.

لماذا: تظل خلايا الوقود بديلاً واعداً لمحركات الاحتراق لأنها تتجنب الطاقة المهدرة التي تصاحب حرق الوقود. ولكن صناعة خلايا وقود ذات كفاءة ومتانة هي أمر صعب ومكلف ماديا. السيارات التي تعمل بخلايا الوقود بدأت للتو بالظهور في الأسواق.

٤. اضحك.

لماذا: مثل أي بنزين ذي رقم أوكتاني كبير، فإن الإكسير هو وقود باهظ الثمن والذي تم تكوينه بعناية لكي يكون صعب الاشتعال. مع أنه يقوم بالعجائب بالنسبة لمحرك ذي انضغاط عالٍ والذي بدونه سيسخّن مزيج الوقود والهواء أكثر مما ينبغي ويتسبب في جعله يدقّ، إلا أن مقاومته للاشتعال يُعد هدرا في معظم المحركات العادية.

٥. مثل كل المحركات الحرارية، يمكن لمحرك البخار أن يحوّل المزيد من الطاقة الحرارية إلى شغل عندما تزداد درجة حرارة جسمه الساخن (البخار).

لماذا: يحوّل المحرك البخاري الطاقة الحرارية إلى شغل حينما تتدفق الحرارة من البخار الساخن إلى الهواء الخارجي. كلما زاد الفرق في درجة الحرارة بين هذين الجسمين، زادت كفاءة المحرك البخاري في تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل. ولهذا تستخدم معظم المحركات البخارية بخاراً ساخناً جدا.

٦. الشخص الذي يدير العمود كان عليه أن يقوم بكل الشغل المطلوب لتحريك مكبس المحرك خلال الأشواط الثلاثة غير شوط الإشعال.

لماذا: قبل بدء المحرك بالعمل وحده، لم يكن يستطيع توفير أي جزء من الطاقة التي تحتاجها الأسطوانات أثناء أشواط السحب والانضغاط والعادم. كان يجب على الشخص الذي يدير العمود أن يوفّر هذه الطاقة. بمجرد أن يبدأ الوقود بالاحتراق، فإن أشواط الإشعال يمكنها أن تتولى الأمر، لكن قبل هذه اللحظة كانت إدارة العمود عملاً مرهقاً.

دقق في أرقامك - الإجابات

٨-١ مكيفات الهواء

١. 200Watt

لماذا: بما أن الطاقة الداخلية للدراجة لا يمكنها أن تتزايد أو تتناقص للأبد، فمن المحتم أنها تبعث قدرة حرارية إلى الغرفة بنفس مقدار القدرة الميكانيكية التي تستقبلها منك. كما هو متطلب من معادلة (٨,١,١)، فإن الـ 200Watts من القدرة الميكانيكية التي توفرها للدراجة تتدفق إلى الغرفة كـ 200Watts من القدرة الحرارية.

٢. 100J.

لماذا: الفرق في درجة الحرارة بين الهواء الداخلي والهواء الخارجي هو 30K، فوفقا للمعادلات (٨,١,٢)، فإن مضخة الحرارة يمكنها أن تزيل 9 أضعاف الحرارة من الهواء الخارجي مما تستهلكها في الشغل، وأن توفّر 10 أضعاف الحرارة للهواء الداخلي. وهكذا يتطلب فقط 100J من الطاقة الكهربائية لإزالة 900J من الحرارة من الهواء الخارجي وتوفّر كل الـ 1000J كحرارة للهواء الداخلي. يا له من مكسب!

٨-٢ السيارات

١. 400J

لماذا: بما أن الجسم الساخن عند 450K وفرق درجة الحرارة هو 150K، فإن معادلات (٨,٢,١) تسمح لثلث الحرارة المزالة من السخّان أن تتحوّل إلى شغل. يجب أن تتدفق الـ 800J المتبقية من الحرارة إلى الهواء الخارجي.

تمارين

١. لا تستطيع برّادات الماء التي تقوم فعلياً بتبريد الماء الذي تقدمه أن تعمل بدون تهوية. في العادة يكون لها شقوق تهوية في جوانبها لكي يستطيع الهواء أن يتدفق خلالها. لماذا تحتاج لتدفق الهواء هذا؟

٢. إذا فتحت باب ثلاجتك على أمل أن تبرّد غرفتك، ستجد في الحقيقة أن درجة حرارة غرفتك سترتفع بعض الشيء. لماذا لا تقوم الثلاجة بإزالة الحرارة من الغرفة؟

٣. الجزء الخارجي من وحدة تكييف الهواء المركزي له مروحة تقوم بنفخ الهواء عبر أنابيب المكثف. إذا تعطلت هذه المروحة، لماذا لا يستطيع مكيف الهواء أن يبرّد المنزل بشكل جيّد؟

٤. إذا سددت فتحة إخراج مضخة هواء يدوية والتي تستخدم في الدراجات ودفعت المقبض إلى الداخل لضغط الهواء داخل المضخة، سوف تصبح المضخة أدفأ. لماذا؟

٥. عندما انضغط الغاز الذي يكوّن الشمس حالياً على بعضه بفعل الجاذبية، ماذا حدث لدرجة حرارة ذلك الغاز؟ لماذا؟

٦. لماذا يزيد احتمال دقّ السيارة في يوم ساخن عنه في يوم بارد؟

٧. تقوم سدادة صودا بكربنة الماء بحقن غاز ثاني أكسيد الكربون فيه. يأتي الغاز مضغوطا في وعاء فولاذي صغير. حينما يترك الغاز الوعاء ويشق طريقه إلى داخل الماء، لماذا يصبح الوعاء باردا؟

٨. يجب على الطائرة المحلقة عاليا أن تضغط الهواء الخارجي البارد النقي قبل توصيله إلى الكابينة. لماذا يجب أن يُكيّف هذا الهواء بعد ضغطه؟

٩. إذا أسقطت مزهرية زجاجية على الأرض، فسوف تصبح شظايا. لكن إذا أسقطت تلك الشظايا على الأرض فإنها لن تصبح مزهرية زجاجية. لمَ لا؟

١٠. عندما ترمي حجرا ساخنا في بركة باردة، ماذا يحصل لانتروبي النظام الإجمالي؟

١١. ماذا يمنع النصف السفلي من كأس ماء من التجمد تلقائيا بينما يصبح النصف العلوي ساخنا جداً؟

١٢. افترض أن شخصا ما ادعى أن لديه جهازاً يمكنه تحويل الحرارة من الغرفة إلى قدرة كهربائية بشكل مستمر. ستعلم أن هذا الجهاز هو احتيال لأنه سيعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية. فسر ذلك.

١٣. لماذا يغطي الثلج الأرض بشكل موحّد تقريباً بدلا من إنشاء تراكمات مرتفعة في بعض المناطق وبقع عارية في مناطق أخرى؟

١٤. إذا نقلت صينية طبخ زجاجية من فرن ساخن إلى حوض ماء بارد، فإنه من المحتمل أنها ستنكسر. ما الذي ينتج الطاقة الميكانيكية المنتظمة المطلوبة لكسر الزجاج؟

١٥. تميل دورات التجمد والإذابة لإتلاف الطرق المرصوفة في فصل الشتاء بتكوين حُفر. ما الذي يوفّر الشغل الميكانيكي الذي يكسر الأرضية المرصوفة؟

١٦. يتوزّع الهواء القريب من الموقد خلال الغرفة. ما الذي يوفّر الطاقة اللازمة لإبقاء الهواء متحركا؟

١٧. تندفع الرياح بفعل الفروق في درجات الحرارة عند سطح الأرض. يرتفع الهواء فوق المناطق الساخنة وينخفض فوق المناطق الباردة، مكوّناً خلايا حمل عملاقة من الهواء الدائر. بالقرب من الأرض، تهُب الرياح من المناطق الباردة باتجاه المناطق الساخنة. فسّر كيف أن الغلاف الجوي يعمل كمحرك حراري.

١٨. الأعاصير هي محركات حرارية عملاقة تدفعها الطاقة الحرارية في مناطق المحيطات الدافئة ويدفعها الانتظام في المناطق الباردة المحيطة. لماذا تكون الأعاصير أكثر عنفا عندما تتكوّن فوق مناطق مياه ساخنة على غير العادة في نهاية فصل الصيف؟

١٩. في يوم مشمس صحو، تسخن الأرض بشكل متساوٍ ولا يوجد إلا القليل من الرياح. استخدم القانون الثاني للديناميكا الحرارية لتفسير هذا الغياب في الرياح.

٢٠. النبتة هي محرك حراري يعمل على تدفق ضوء الشمس من الشمس الساخنة إلى الأرض الباردة. تعد النبتة نظاماً عالي الانتظام بانتروبي منخفض نسبيا. لماذا لا يعارض نمو النبتة القانون الثاني للديناميكا الحرارية؟

٢١. يحرق محرك الديزل وقوده عند درجة حرارة أعلى من محرك البنزين. لماذا يسمح هذا الفرق لمحرك الديزل أن يكون أكثر كفاءة في تحويل طاقة الوقود إلى شغل؟

٢٢. الصاروخ الكيميائي هو محرك حراري، يُدفع للأمام بواسطة نفث عادمه الساخن. كلما زادت سخونة النار داخل الصاروخ الكيميائي، زادت إمكانية الصاروخ أن يكون أكثر كفاءة. فسر هذه الحقيقة بدلالة القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

٢٣. يدّعي شخص تعرفه أنه بنى سيارة تقوم بحرق البنزين ولا تطلق أي حرارة للبيئة المحيطة بها. استخدم القانون الثاني للديناميكا الحرارية لكي توضح أن هذا الادعاء مستحيل.

مسائل

١. تقوم بخلط 1kg من الماء إلى أن ترتفع درجة حرارته بمقدار 1°C. ما مقدار الشغل الذي بذلته على الماء؟

٢. حينما تقوم بتلميع تمثال من النحاس الأصفر كتلته 1kg، فأنت تبذل شغلاً مقداره 760J ضد احتكاك الانزلاق. بفرض أن كل الحرارة الناتجة تتدفق إلى داخل التمثال، ما مقدار الارتفاع في درجة حرارته؟

٣. تقوم بإسقاط كرة من الرصاص على أرضية من الأسمنت من على ارتفاع 10 m. عندما تتوقف الكرة عن الارتداد، ماذا سيكون مقدار ارتفاع درجة حرارتها؟

٤. ما هو الارتفاع – بالتقريب – الذي يمكن أن ترفع كرة نحاسية نفسها إليه إذا كانت درجة حرارتها 300K واستطاعت أن تحوّل جميع طاقتها الحرارية إلى شغل؟

٥. يحتاج حفر ثقب في قطعة من الخشب إلى 1000J من الشغل. ما مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية الكلية للخشب والحفّار نتيجة هذه العملية؟

٦. يبرّد المجمّد ذو الكفاءة المثالية الطعام إلى درجة حرارة 260K. إذا كانت درجة حرارة الغرفة 300K، فما مقدار الشغل الذي يستهلكه هذا المُجمّد عندما يزيل 100J من الحرارة من الطعام؟

٧. تزيل الثلاجة ذات الكفاءة المثالية 900 J من الحرارة من الطعام عند 270K. ما مقدار الحرارة التي تنقلها بعدها للغرفة التي درجة حرارتها 300K؟

٨. تنقل مضخة حرارية ذات كفاءة مثالية 1000J من الحرارة إلى هواء الغرفة عند 300. إذا استخلصت المضخة حرارة من الهواء الخارجي الذي درجة حرارته 260K، أي مقدار من تلك الحرارة المنقولة كان في الأصل شغلا مستهلكا في النقل؟

٩. يُبقي مكيف الهواء ذو الكفاءة المثالية هواء الغرفة عند 300K عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارجي 310K. ما مقدار الشغل الذي يستهلكه عندما ينقل 1240J من الحرارة إلى الخارج؟

١٠. يوفّر محرك طائرة ذو كفاءة مثالية شغلا حينما تتدفق الحرارة من الغازات المحترقة عند 1500K إلى الهواء عند 300K. ما نسبة الحرارة المغادرة للغازات المحترقة التي تتحوّل إلى شغل؟

١١. يعمل محرك قارب بخاري ذو كفاءة مثالية على بخار درجة حرارته 500K في طقس درجة حرارته 300K. ما مقدار الشغل الذي يمكن أن يحصل عليه عندما تغادر 1000J من الحرارة البخار؟

١٢. يُدفع نسيم بعيد عن الشاطئ بواسطة الحرارة المتدفقة من الأرض الساخنة (310K) إلى الماء البارد (290K). بفرض المثالية في الكفاءة، ما مقدار الشغل الذي يمكن أن يوفره هذا النسيم لكل 1000J من الحرارة التي يحملها بعيدا عن الشاطئ؟

١٣. ينتج نظام طاقة شمسية ذو كفاءة مثالية شغلا عندما تتدفق الحرارة من سطح الشمس الذي درجة حرارته 6100K إلى هواء الغرفة الذي درجة حرارته 300K. ما النسبة من الحرارة الشمسية التي يمكن أن يحولها النظام إلى شغل؟

الفصل ٩

الرنين والموجات الميكانيكية

إن العديد من الحركات المثيرة في العالم من حولنا هي حركات تكرارية. حياتنا مليئة بالدورات، من مرور الشمس اليومي فوق رؤوسنا إلى تموّج البحيرة بموجات صغيرة في يوم ممطر. هذه الحركات الدورية محكومة بقوانين فيزيائية، وهي ترسم رحلتنا بثبات خلال الزمان والمكان. بعض هذه الدورات تنظم حياتنا للضرورة أو للعادة، بينما البعض الآخر موجودة لكي تُلاحظ. وهناك دورات أخرى أصبحت جزءاً من حياتنا اليومية لأنها مفيدة أو ممتعة. هذا الفصل هو عن الحركات الدورية في ثلاثة جوانب: في الساعات، وفي الآلات الموسيقية، وعند شاطئ البحر.

تجربة: الكأس الزجاجية الغنائية

إحدى التجارب البسيطة للحركة الدورية تتضمن كأساً زجاجية كريستالية، وقليلاً من الماء، ولمسة ناعمة. تكون الكأس الزجاجية الكريستالية صلبة ورقيقة وتدعم بسهولة حركة ميكانيكية متكررة تسمى تذبذباً. إن صلابة الكأس تسمح لها بالمحافظة على الطاقة في هذه الحركة التذبذبية لمدة طويلة بحيث تصدر صوت رنين عندما تطرقها بلطف بملعقة، ويمكنها أن تحصل على طاقة ببطء من خلال الطريقة الموصوفة أدناه.

التجربة ذاتها هي نشاط اكتشفها العديد من الشباب الضجرين الجالسين وقتاً طويلاً في مطعم فاخر بوجود فقط أدوات الطعام كوسيلة ترفيهية. إذا بللت إصبعك قليلا وأدرته بلطف على طول شفة الكأس الزجاجية بسرعة بطيئة ثابتة، فإنك ستتمكن من جعل الكأس الزجاجية تُغني بصوت عال. ستتذبذب جدران الكأس ذهابا وإيابا وتصدر نغمة واضحة.



بإذن لو بلومفيلد

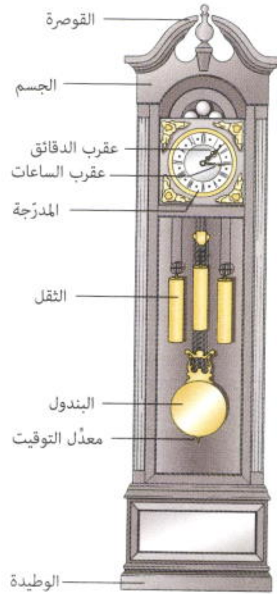
إذا لم تستطع إيجاد كأس زجاجية كريستالية، فقد تكون غير محظوظ. فإن الكأس العادية لا تعمل بشكل جيّد لأنها تحوّل الطاقة من إصبعك إلى طاقة حرارية بسرعة ولا تصدر صوتا كبيرا. على كل حال، تأكد من أن شفة الكأس ليس بها حواف حادة حتى لا تجرح إصبعك.

ماذا سيحدث للصوت إذا أضفت بعض الماء للكأس؟ حاول أن تتنبأ كيف ستتغير نبرته؛ وكيف سيتغيّر ارتفاعه. الآن لاحظ ماذا يحدث. هل يمكنك قياس التغيرات؟ هل تحققت من تنبؤاتك؟ هل هناك أي شيء مرئي على سطح الماء حينما تجعل الكأس تتذبذب؟

دليل الفصل

إن تذبذب كأس الزجاج هو مثال للرنين الطبيعي، وهو حركة دورية للكأس ذاتها. سواء طرقت الكأس بلطف بملعقة أو دلكتها بإصبعك، فأنت تتسبب في جعلها تقوم بهذه الحركة المميزة. في هذا الفصل سوف نفحص العديد من الأجسام الأخرى التي تبدي رنينا طبيعيا: (١) الساعات، و(٢) الآلات الموسيقية، و(٣) البحر.

في قسم الساعات، سوف ندرس البندول، وحلقات التوازن، وكريستالات الكوارتز لرؤية كيفية استخدام رنينها الطبيعي لقياس مرور الوقت. في قسم الآلات الموسيقية، سننظر في تذبذب الأوتار، والأعمدة الهوائية، ورؤوس الطبلات لمعرفة كيف تنتج هذه الآلات أصواتها الموسيقية ونتعلم كيف تنتقل هذه الأصوات إلى آذاننا. وفي البحر، سننظر في طبيعة الموجات على سطح الماء ونكتشف قضايا مثل المد والجزر، والسونامي، والموج المتكسر على الشاطئ. لعرض أكثر تفصيلا، انتقل لملخص الفصل في صفحة 288.



٩-١ الساعات

يقيس الناس أعمارهم تبعاً للسماء، بتقسيم الوجود إلى أيام، وأشهر، وسنوات بناء على الحركات الكونية للشمس والقمر والنجوم. لكن على المقياس الأقل رومانسية للحياة اليومية فإن السماء لا توفر سوى مساعدة قليلة. بما أن السماء لا توفّر طريقة بسيطة لقياس فترات زمنية قصيرة، اخترع الناس الساعات.

صُنعت الساعات القديمة على أساس الزمن الذي استغرقه إكمال عمليات بسيطة - مثل تدفق الرمل أو الماء، أو احتراق الشموع. لكن هذه الساعات كان لها دقة محدودة وتطلبت مراقبة دائمة. الساعات الأفضل تقيس الزمن بحركات تكرارية مثل التأرجح أو الاهتزاز. في هذا القسم، سوف نفحص عمل الساعات الحديثة المستندة على الحركات التكرارية. وبينما نقوم بذلك، سنرى أن الحركات التكرارية مثيرة بحد ذاتها وتظهر في كافة أنحاء الطبيعة في أشياء كثيرة غير الساعات.

أسئلة للتفكير

ما هو الوقت بالضبط؟ لماذا تتأرجح بعض الأجسام أو تهتز ذهابا وإيابا بشكل متكرر؟ كيف يمكنك استخدام الحركة التكرارية لقياس الزمن؟ كيف يمكنك تغيير المعدل الذي يتأرجح به الجسم أو يهتز؟ بما أن الحركات التكرارية عادة لا تستمر للأبد، كيف يمكنك إبقاؤها على حركتها دون أن تؤثر على مقدرتها في ضبط الوقت؟

تجارب يمكن القيام بها

يمكنك بناء جزء ضبط الوقت في ساعة بندول بربط جسم صغير وكثيف بنهاية خيط وتعليق ذلك الخيط من طاولة أو إطار الباب. ادفع الجسم بلطف بحيث يتأرجح ذهابا وإيابا. ستجد أنه يُكمل هذه الحركة التكرارية بانتظام عظيم. ما الذي يحدّ انتظاميته؟

إذا كان طول الخيط *25cm (10in)* تقريباً، فالأرجحة الكاملة (ذهابا وإيابا) ستأخذ تقريبا *1s* بالضبط. غيّر طول الخيط ولاحظ تأثيره على التأرجح. هل تعتقد أن وزن الجسم يؤثر على التأرجح؟ جرّب جسما آخرا وانظر إن كنت على حق. الآن غيّر مدى التأرجح وانظر إذا كان يؤثر على الزمن الذي تأخذه كل أرجحة. كيف يمكن لأرجحة صغيرة أن تأخذ نفس الزمن الذي تأخذه أرجحة كبيرة؟ لاحظ أنه يمكنك أن تجعل الجسم يتأرجح بدفعه بشكل متناغم. دفع الجسم في أوقات عشوائية لن ينفع؛ يجب أن تدفع الجسم بتزامن مع حركته. في أي الأوقات يجب أن تدفع الجسم لجعله يتأرجح لمسافة أبعد؟ لجعله يتأرجح لمسافة أقل؟ الدفعات التناغمية من هذا النوع هي التي تُبقي ضابط الوقت في الساعة متحركاً، ساعة بعد ساعة.

الزمن

قبل فحص الساعات، يجب أن نأخذ نظرة سريعة عن الوقت ذاته. يعامل العلماء الزمن على أنه بُعد، مشابه ولكن ليس مطابقاً للأبعاد المكانية الثلاثة التي ندرك بها العالم من حولنا. في المجموع، كوننا له أربعة أبعاد: ثلاثة أبعاد مكانية وبُعد واحد زماني. ولذا يتطلب الأمر أربعة أرقام لتحديد بالكامل متى وأين حدث الحدث؛ تحدد ثلاثة أرقام موقع الحدث وواحد يحدد لحظته الزمنية.

الاختلاف الواضح بين المكان والزمان هو أنه في حين يمكننا رؤية المكان ممتداً حولنا، إلا أننا يمكننا فقط ملاحظة مرور الوقت. بالرغم من أننا نشغل موقعاً واحداً فقط في المكان في أي لحظة معينة، إلا أننا أكثر إدراكا بطريقة ما لامتداد المكان من حولنا. من الأصعب أن تشعر بالإطار الكامل للزمن ممتدا للماضي والمستقبل: يجب عليك أن تستخدم خيالك.

إن إدراكنا للمكان مبني تماما على حاجة القوى، والتسارعات، والسرعات للسفر من مكان لآخر. تبدو مدينة بعيدة جدا لأننا نعلم أن السفر إليها بقوى، وتسارعات، وسرعات معقولة سيأخذ وقتا طويلا. إدراكنا للزمن مستند على نفس المبادئ الميكانيكية. إذا فُصلت لحظتان بزمن طويل، فعندها ستسمح لنا قوى وتسارعات وسرعات معقولة بالسفر لمسافات طويلة بين اللحظتين. باختصار، إدراكنا للمكان والزمان مترابط، وقياسات الزمان والمكان مترابطة أيضا.

نحن نقيس المكان بالمساطر والزمن بالساعات. لكن كيف تصنع مسطرة؟ يمكنك بناء مسطرة طويلة نوعا ما بقيادة سيارة بسرعة ثابتة ووضع علامات من الطلاء على الأرضية المرصوفة مرة كل ثانية. لن تكون مسطرتك عملية جدا، لكنها ستوافق تعريف المسطرة بكونها لها علامات مكانية عند مسافات منتظمة. سوف تستخدم حركتك خلال الزمن لتقيس المكان.

كيف يمكنك أن تصنع ساعة؟ يمكنك أن تصنع ساعة عجيبة بعض الشيء بقيادة سيارتك بسرعة ثابتة على طول مسطرتك العملاقة وتعد كل مرة تشاهد فيها مرور إحدى علاماتك. عندها تكون قد استخدمت حركتك خلال المكان لقياس الزمن. معظم الساعات تستخدم الحركة فعلياً لقياس الزمن. لكن كما سنرى قريباً، تستخدم الساعات حركات موجزة أكثر من جولة بالسيارة.

تحقق من فهمك # ١: قمة الارتداد القمري (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

لقياس المسافة من الأرض إلى القمر، يقوم العلماء بارتداد الضوء من عاكسات موضوعة على القمر من قبل رواد فضاء مركبة أبولو. يسير الضوء بسرعة ثابتة. كيف يمكن لقياس زمن سير الضوء من وإلى القمر أن يستخدم لتحديد المسافة من الأرض إلى القمر؟

الرنين الطبيعي

إن حركة ضبط الزمن المثالية يجب أن توفر كلا من الدقة والملاءمة. هذا يلغي بعضا من الاختيارات الواضحة. فالشمس والقمر والنجوم تضبط الزمن بدقة لكنها تفشل في مقياس الملاءمة. بالتأكيد، يهيمن حفظ الطاقة وكمية الحركة وكمية الحركة الزاوية على حركاتها بحيث تتحرك تلك الأجرام السماوية باستقرار وبشكل متوقع خلال السماوات، قرنا بعد قرن، لكن ماذا ستفعل في يوم غائم؟ وفي حين تكون مؤقتات الفترات البسيطة مثل الساعات الرملية والشموع المحترقة سهلة الصنع والاستخدام، إلا أنها ليست دقيقة جدا. إضافة إلى ذلك، من الذي سيظل مستيقظا طول الليل لإضاءة شموع جديدة فقط لإبقاء «الساعة» مستمرة؟ (للاطلاع على ساعة كونية مثيرة، انظر [١٥]).

[١٥] جوسيلين بل (فلكية بريطانية، ١٩٤٣ - م)، ابنة مصمم مراصد فلكية، اكتسبت اهتماما مبكرا في الفلك اللاسلكي. نُصحت بدراسة الفيزياء أولا: فأصبحت المرأة الوحيدة في فصل من ٥٠ طالب في جامعة جلاسجو. بينما كانت تعمل على رسالتها للدكتوراة في جامعة كيمبردج، اكتشفت بل مصدراً خارج الأرض يبعث نبضات موجات راديو، تحدث تماما كل ١,٣٣٧٣٠١١٣ ثانية. لقد اكتشفت النجم النبّاض الأول، وهو نجم منهار تُبقيه كمية حركته الزاوية دائراً حول نفسه بمعدل منتظم بشكل رائع. كل نبضة تزامنت مع دورة واحدة لما تبقى من النجم.

بدلا من ذلك، تستند الساعات العملية على نوع خاص من الحركة التكرارية يسمى الرنين الطبيعي. في الرنين الطبيعي، تتسبب الطاقة في جسم معزول أو نظام من الأجسام المعزولة في جعلها تقوم بحركة محددة مرارا وتكرارا. تُظهر العديد من الأجسام في عالمنا رنينا طبيعيا، من تحريك الكرسي الهزّاز، إلى الماء المقرقر في حوض، إلى تموج سارية العلم، ويتضمن هذا الرنين الطبيعي في العادة حركة حول اتزان مستقر. مثل تذبذب الميزان الزنبركي في قسم ٣-١، فإن الجسم الذي أُزيح عن اتزانه المستقر يتسارع نحو ذلك الاتزان لكن عندما يصله يتجاوزه بسرعة؛ يمر خلال موقع الاتزان ويجب أن يدير اتجاه حركته لإعادة المحاولة مرة أخرى. طالما أن الجسم لديه طاقة إضافية، فإنه سيستمر بالتحرك ذهابا وإيابا خلال اتزانه وبالتالي يُظهر رنينا طبيعيا.
بعض أنواع الرنين، مثل تلك التي للكرات المرتدة والقناني المتأرجحة، لا تحافظ على إيقاع ثابت وليست مناسبة للساعات. ولكننا على وشك أن نقابل مجموعة من الرنين منتظمة جدا والتي يمكن أن تستخدم لقياس مرور الوقت بدقة عالية. هذه الأنواع من الرنين تنتسب لنوع مهم من الأنظمة الميكانيكية تُعرف بالمتذبذبات التوافقية.

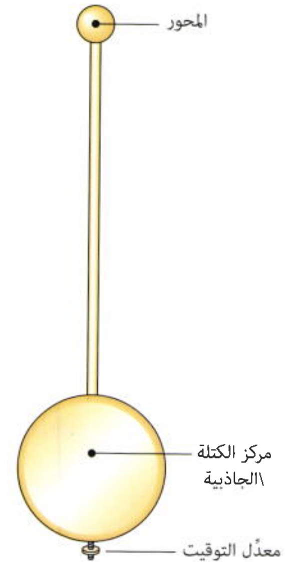
تحقق من فهمك #٢: ساعة توقيت البيض (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

بالرغم من أن الساعة الرملية يمكن أن تُجعل تكرارية بقلبها كل مرة ينفد منها الرمل، إلا أن عملية إعادة التشغيل اليدوية تُحدث أخطاء في التوقيت. إذا قُلبت ساعة رملية ذات ثلاث دقائق 10 ثوان تقريباً بعد نفاد الرمل دائماً، ما هي دقة قياسها للوقت على مدار يوم كامل؟

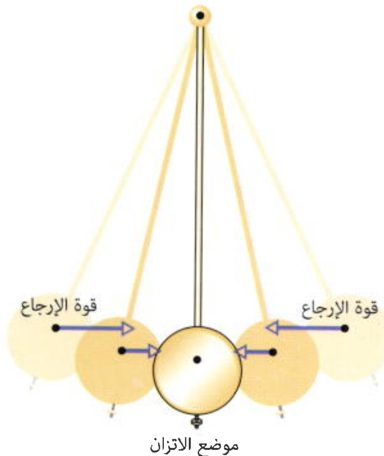
البندول والمتذبذبات التوافقية

من أوائل الرنين الطبيعي الذي استُخدم في الساعات تأرجح البندول – وهو ثقل معلّق من نقطة ارتكاز (شكل ١,١,٩). عندما يكون مركز ثقل البندول تحت نقطة ارتكازه مباشرة، فإنه يكون في وضع اتزان مستقر. عندها يكون مركز ثقل البندول في أدنى نقطة ممكنة، لذا فإن إزاحته ترفع من طاقة جذبه الكامنة وتبدأ قوة إرجاع بدفعه لإعادته باتجاه موقع الاتزان (شكل ٢,١,٩). لأسباب هندسية، تتناسب قوة الإرجاع هذه تماما تقريباً مع بعد البندول عن الاتزان. عندما تُزيح البندول بثبات عن الاتزان، فإن قوة الإرجاع المؤثرة عليه تتزايد بثبات أيضا.

عندما تُطلق البندول المزاح، فإن قوة إرجاعه تجعله يتسارع عائداً نحو الاتزان. لكن بدلاً من التوقف، فإن البندول يتأرجح ذهاباً وإياباً حول موضع اتزانه في حركة تكرارية تسمى تذبذباً. أثناء تأرجحه، تتناوب طاقة البندول بين الشكل الكامن والحركي. حينما يتأرجح بسرعة خلال موضع اتزانه في منتصف الأرجحة، فإن



شكل ١,١,٩: يتكوّن البندول من وزن معلق من نقطة ارتكاز. يكون البندول في وضع اتزان مستقر عندما يكون مركز ثقله تحت نقطة الارتكاز مباشرة.



شكل ٢,١,٩: إذا أملت مركز ثقل البندول بعيداً عن موضع اتزانه، فإنه يواجه قوة إرجاع تتناسب مع بعده عن ذلك الموضع الاتزاني.

طاقته كلها حركية. عندما يتوقف لحظياً عند نهاية الأرجحة، فإن طاقته كلها طاقة جذب كامنة. هذا التحوّل المتكرر للطاقة الإضافية من شكل لآخر هو جزء من أي تذبذب، ويُبقي المتذبذب - النظام الذي يعاني من التذبذب - متحركاً ذهاباً وإياباً إلى أن تتحوّل تلك الطاقة الإضافية إلى طاقة حرارية أو تنتقل لمكان آخر.
لكن البندول ليس مجرد أي متذبذب. بما أن قوة إرجاعه تتناسب مع إزاحته عن اتزانه، فإنه متذبذب توافقي - وهو أبسط نظام ميكانيكي في الطبيعة ومفهوم جدا. كمتذبذب توافقي، يخضع البندول لحركة توافقية بسيطة، أي تذبذب منتظم ومتوقع تجعله مؤقتاً رائعاً للوقت.

إن الزمن الدوري لأي متذبذب توافقي - أي الزمن الذي يستغرقه لإكمال دورة واحدة كاملة لحركته - يعتمد على مقدار صلابة قوة إرجاعه عند دفعه ذهاباً وإياباً وعلى معاندة كتلته في مقاومتها حركة الذهاب والإياب. الصلابة هي مقياس لمقدار حدة تقوي قوة الإرجاع حينما ينزاح المتذبذب عن الاتزان؛ ترتبط قوى الإرجاع المتصلبة بالأجسام الصلبة والقاسية، بينما ترتبط قوى الإرجاع الأقل صلابة بالأجسام الرقيقة. كلما زادت صلابة قوة الإرجاع، دفعت المتذبذب ذهاباً وإياباً بقوة أكبر وقلّ الزمن الدوري للمتذبذب. على الجانب الآخر، كلما زادت كتلة المتذبذب، قلّ تسارعه وزاد زمنه الدوري.

ولكن الخاصية الأكثر روعة وأهمية للمتذبذب التوافقي ليس أن زمنه الدوري يعتمد على الصلابة والكتلة، بل أن زمنه الدوري لا يعتمد على السعة - أقصى بُعد عن الاتزان. سواء كانت تلك السعة كبيرة أو صغيرة، فإن الزمن الدوري للمتذبذب التوافقي يظل نفسه تماما. عدم الحساسية للسعة هو نتيجة لقوة إرجاعه الخاصة، إرجاع يتناسب مع الإزاحة عن الاتزان. عند السعات الكبيرة، يتحرك المتذبذب لبُعد أكبر في كل دورة، ولكن القوى التي تجعله يتسارع خلال تلك الدورة أقوى كذلك. إجمالا، يُكمل المتذبذب التوافقي دورة كبيرة من الحركة بنفس السرعة التي يُكمل بها دورة صغيرة من الحركة.

إن المتذبذبات التوافقية ذات قوى إرجاع متصلبة وكتل صغيرة لها أزمان دورية قصيرة، بينما تلك التي لها قوى إرجاع مرنة وكتل كبيرة لها أزمان دورية طويلة. ببساطة، لا تؤثر سعة التذبذب على أزمانها الدورية، ولهذا تكون المتذبذبات التوافقية مثالية جدا في ضبط الوقت. بما أن الساعات العملية لا يمكنها التحكّم تماما في سعة متذبذباتها المسؤولة عن ضبط الوقت، فإن جميعها تقريباً تستند على المتذبذبات التوافقية.

المتذبذبات التوافقية

المتذبذب التوافقي هو الذي تتناسب قوة إرجاعه مع الإزاحة. يعتمد زمن تذبذبه الدوري على صلابة قوة الإرجاع تلك وعلى كتلته، وليس على سعة تذبذبه.

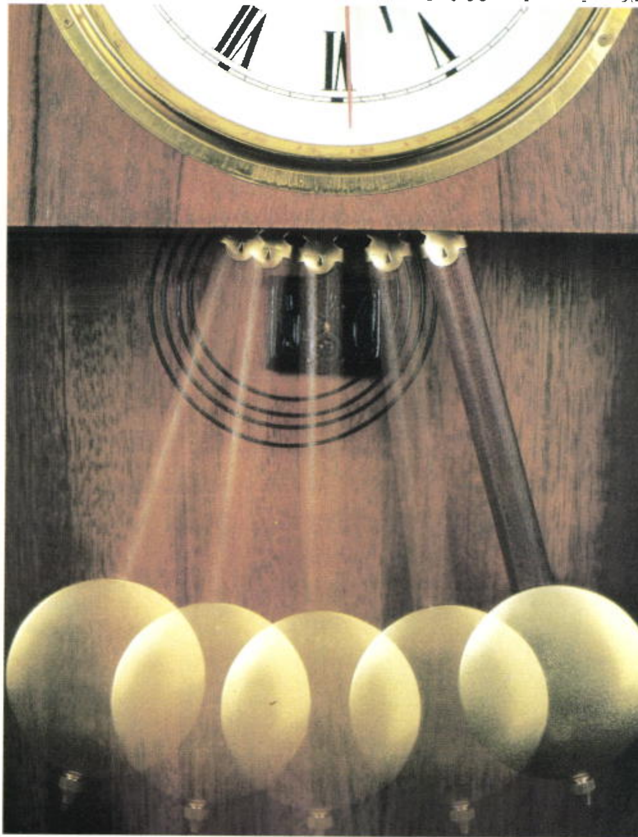
في الحقيقة، البندول هو متذبذب توافقي غير اعتيادي لأن زمنه الدوري لا يعتمد على كتلته. ذلك لأن زيادة كتلة البندول تزيد أيضا من وزنه وبالتالي تزيد من صلابة قوة إرجاعه. هذان التغيران يعوضان بعضهما البعض تماما بحيث لا يتغيّر الزمن الدوري للبندول.

ولكن الزمن الدوري للبندول يعتمد على طوله وعلى الجاذبية. عندما تقلل من طول البندول - أي المسافة من نقطة ارتكازه إلى مركز كتلته - فأنت تزيد من صلابة قوة إرجاعه وتقصّر زمنه الدوري. بالمثل، عندما تقوّي الجاذبية (ربما بالسفر إلى كوكب المشتري)، فأنت تزيد وزن البندول، وتصلّب قوة إرجاعه، وتقصّر زمنه الدوري. بالرغم من أننا لن نحاول إثبات ذلك، فإن الزمن الدوري للبندول هو:

$$\text{الزمن الدوري للبندول} = 2\pi\sqrt{\frac{\text{طول البندول}}{\text{التسارع بسبب الجاذبية}}}$$

وهكذا يتأرجح بندول قصير مراراً أكثر من بندول طويل، ويتأرجح أي بندول مراراً أكثر على الأرض مقارنة بتأرجحه على القمر. على سطح الأرض، البندول الذي طوله 0.248m (10in) له زمن دوري مقداره 1s (شكل ٣,١,٩)، وذلك يجعله مناسباً للساعة

روبرت ماثينا\فاندامينتال فوتوغرافس



شكل ٣،١،٩: يتحكم البندول المتأرجح بحركة عقارب الساعة. طول البندول هو 0.248m، من نقطة الارتكاز إلى مركز الكتلة/الثقل، لذا فإن كل دورة تستغرق 1s لتكتمل وتُقدّم العقارب بمقدار ثانية واحدة.

الحائطية والتي يتقدم عقرب الثواني بها بمقدار ثانية واحدة كلما ينهي البندول دورة كاملة. بما أن الزمن الدوري للبندول يتزايد بزيادة الجذر التربيعي لطوله، فإن بندولاً ذا طول مقداره 0.992m (40in) (أربعة أضعاف بندول طوله 0.248m) يستغرق2s لإكمال دورته وهو مناسب لساعة أرضية يتقدم عقرب الثواني بها بمقدار ثانيتين في كل دورة.

بما أن الزمن الدوري للبندول يعتمد على طوله وعلى الجاذبية، فإن التغيّر في أي منهما يُحدث مشاكل. كما تعلمنا في الفصل السابع، تتمدد المواد بزيادة درجة الحرارة، فيتباطأ البندول البسيط عندما يسخن. أما البندول الأكثر دقة فيُعادل حرارياً باستخدام عدة مواد لها معاملات تمدد حجمي مختلفة لضمان أن مركز كتلته يظل على بعد ثابت من نقطة ارتكازه.
في حين لا تتغيّر الجاذبية مع الزمن، إلا أنها تختلف بشكل طفيف من مكان لآخر. لتصحيح الاختلافات في الجاذبية بين المصنع والموضع النهائي للساعة، فإن بندول الساعة له مقبض تعديل خيطي. يسمح لك هذا المقبض بتغيير طول البندول لإجراء تعديلات دقيقة لزمنه الدوري.

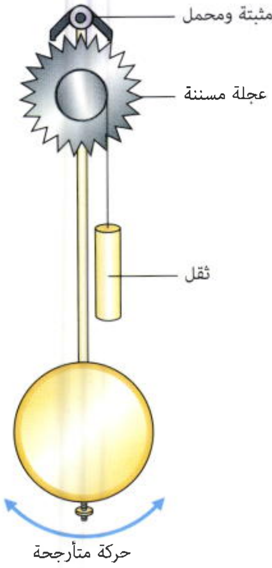
تحقق من فهمك #٣: زمن التأرجح

(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

يسير طفل يتأرجح في أرجوحة ذهاباً وإياباً بسرعة ثابتة. ما الذي يحدد الزمن الدوري لحركته؟

ساعات البندول

مع أن البندول يحافظ على إيقاع ثابت، إلا أنه ليس ساعة متكاملة. يجب أن يكون هناك شيء يُبقي البندول متأرجحا ويستخدم ذلك التأرجح لتحديد الزمن. تقوم ساعة البندول بهذين العملين. فهي تجعل حركة البندول مستمرة بدفعات لطيفة، وتستخدم تلك الحركة لتقديم العقارب بمعدل ثابت.
أعلى البندول له مثبّت ذو رأسين يتحكم بدوران عجلة مسننة (شكل ٤،١،٩). تسمى هذه الآلية الإفلات. يبذل سلك ذو وزن معلق وملفوف حول عمود العجلة المسننة عزما دورانيا على تلك العجلة، بحيث تدور العجلة حول نفسها إذا لم يوقفها المثبّت في مكانها. كلما يصل البندول نهاية تأرجحه، يطلق أحد أطراف المثبّت العجلة المسننة بينما الطرف الآخر يمسك بها. تدور العجلة ببطء بينما يهتز البندول ذهابا وإيابا، ويتقدم بمقدار سن واحدة لكل دورة كاملة للبندول. تدير هذه العجلة سلسلة من التروس، والتي تُقدّم عقارب الساعة ببطء. بالرغم من أن هذه العقارب هي في الحقيقة تقوم بعدّ تأرجحات البندول منذ منتصف الليل، إلا أن حركتها منضبطة بحيث تشير مواقعها للوقت الحالي.

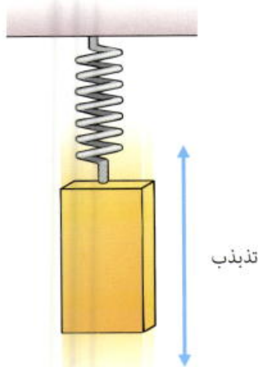


شكل ٤،١،٩: تستخدم ساعة البندول بندولاً متأرجحاً لتحديد سرعة دوران عجلة مسننة ودفعها لسلسلة من التروس التي تتحكم بعقارب الساعة. يسمح المثبّت للعجلة المسننة بالتقدّم بسن واحدة كلما يكمل البندول دورة كاملة.

تحافظ العجلة المسننة أيضاً على تحرك البندول بإعطاء المثبّت دفعة صغيرة جدا إلى الأمام كلما يكمل البندول أرجحة واحدة. بما أن المثبّت يتحرك في اتجاه الدفع، فإن العجلة تبذل شغلا على المثبّت والبندول، وتعوّض الطاقة المفقودة بسبب الاحتكاك ومقاومة الهواء. تأتي هذه الطاقة من السلك ذي الوزن المعلق، والذي يُطلق طاقة جذب كامنة عند هبوط وزنه. عندما تقوم بلفّ الساعة، فأنت تعيد لف هذا السلك حول العمود، فترفع الوزن وتعيد طاقته الكامنة.

في حين تستطيع هذه الدفعات من العجلة المسننة أن تُبقي حتى البندول غير المتقن الصنع متأرجحا، إلا أن الساعة تعمل بأفضل ما يمكن عندما يتأرجح بندولها بحرية كاملة تقريبا. ذلك لأن أي قوة خارجية - حتى الدفع من قِبل العجلة المسننة - ستؤثر على الزمن الدوري للبندول. إن أدق ضابطات الوقت هي تلك التي يمكنها التذبذب دون أي مساعدة أو تعويض للطاقة لآلاف أو ملايين من الدورات. تحتاج ضابطات الوقت العالية الدقة لمجرد دفعات طفيفة جدا للإبقاء على حركتها وبالتالي لها أزمنة دورية عالية الدقة. ولهذا تستخدم ساعة البندول الجيدة بندولا ذا ديناميكا هوائية ومحامل قليلة الاحتكاك.

أخيرا، يجب أن تبقي الساعة سعة تذبذب بندولها ثابتة نسبيا. من جانب عملي، التغيرات العنيفة في تلك السعة ستجعل العجلة المسننة تدور بشكل شاذ. لكن هناك سبب أساسي آخر لإبقاء سعة البندول ثابتة: إنه ليس متذبذباً توافقياً مثالياً. إذا أزحت البندول بعيدا جدا، يصبح متذبذباً لا توافقياً - تتوقف قوة إرجاعه عن كونها تتناسب مع إزاحته عن الاتزان، ويبدأ زمنه الدوري بالاعتماد على سعته. بما أن التغيّر في زمنه الدوري سيُفسد دقة الساعة، فإن سعة البندول يجب أن تظل صغيرة وثابتة. بهذه الطريقة، لن يكون للسعة أي تأثير تقريباً على الزمن الدوري للبندول.



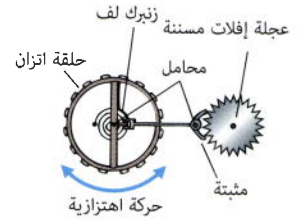
شكل ٥،١،٩: المكعب المتصل بزنبرك هو متذبذب توافقي. يتحدد الزمن الدوري للمتذبذب بصلابة الزنبرك وكتلة المكعب فقط.

تحقق من فهمك #٤: التأرجح عالياً والتأرجح منخفضاً (للإجابة انظر صفحة ٢٨٩)

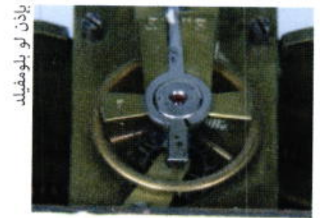
عند دفع طفلة في أرجوحة ساحة اللعب، فأنت في العادة تدفعها إلى الأمام عندما تتحرك بعيدا عنك. ماذا سيحدث إذا دفعتها إلى الأمام كلما تحركت باتجاهك؟

ساعات الاتزان

شكل ٦،١،٩: تستخدم ساعة الاتزان حلقة توازن مهتزة للتحكم بدوران عجلة مسننة والتروس التي تعمل على تقدُّم عقارب الساعة. يسمح المثبّت للعجلة المسننة بالتقدم بمقدار سن واحدة كلما تُنهي الحلقة دورة كاملة. تأتي طاقة الساعة من زنبرك رئيسي (غير موضح) والذي يبذل عزماً دورانياً ثابتاً على العجلة المسننة.



شكل ٦,١,٩: بدوران عجلة مسننة والتروس التي تعمل على تقدُّم عقارب الساعة. يسمح المثبّت للعجلة المسننة بالتقدم بمقدار سن واحدة كلما تُنهي الحلقة دورة كاملة. تأتي طاقة الساعة من زنبرك رئيسي (غير موضح) والذي يبذل عزماً دورانياً ثابتاً على العجلة المسننة.



بإذن لو بلومفيلد



شكل ٧,١,٩: تلتف حلقة الاتزان في هذه الساعة الفرنسية الأثرية ذهابا وإيابا بشكل متناغم تحت تأثير الزنبرك الحلزوني القريب من مركزها. تقلل المحامل الياقوتية التي تدعم الحلقة من الاحتكاك وتسمح لهذه الساعة بضبط الوقت بدقة عالية.

بما أن البندول المتأرجح يعتمد على الجاذبية في قوة إرجاعه، لذا فإنه يجب أن لا يُمال أو يتحرك. ولهذا يوجد القليل فقط من الساعات اليدوية المستندة على البندول. للاستفادة من الخصائص الممتازة للمتذبذب التوافقي في ضبط الوقت، فإن الساعة المتنقلة تحتاج لقوة إرجاع أخرى تتناسب مع الإزاحة لكن لا تعتمد على الجاذبية. تحتاج إلى زنبرك!

كما رأينا في قسم ٣-١، القوة التي يبذلها زنبرك تتناسب مع تشوهه. كلما مددت أو ضغطت أو ثنيت زنبركاً، زاد دفعه عكسيا نحو شكل اتزانه. اربط مكعباً من الخشب بالطرف الحر لزنبرك، وشده بلطف، واتركه، وستجد أن لديك متذبذباً توافقياً بزمن دوري يتحدد فقط بصلابة الزنبرك وكتلة المكعب (شكل ٥,١,٩). بما أن الزمن الدوري للمتذبذب التوافقي لا يعتمد على سعة حركته، فإن المكعب سيتذبذب بثبات حول موضع اتزانه وسيكون ضابطاً ممتازاً للوقت.

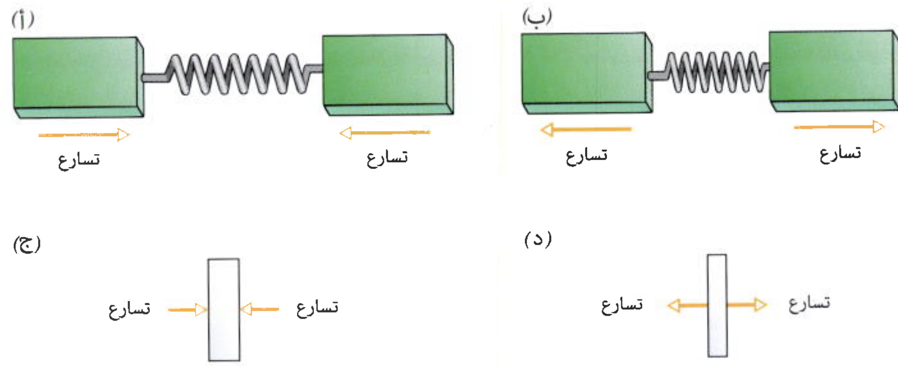
من المؤسف أن الجاذبية تُعقّد هذا النظام البسيط. بالرغم من أن الجاذبية لا تغيّر من الزمن الدوري للمكعب، إلا أنها تُزيح موضع اتزان المكعب للأسفل. تُعدّ هذه الإزاحة مشكلة بالنسبة للساعة التي قد تميل بعض الأحيان. ولكن هناك ضابط وقت آخر مستند على الزنبرك والذي يحسب الزمن بدقة في أي اتجاه أو موقع. هذا الجهاز المبدع، والذي يستخدم في معظم الساعات الميكانيكية واليدوية، يُسمى حلقة اتزان أو مجرد اتزان.
تُشبه حلقة الاتزان عجلة دراجة معدنية صغيرة جدا، مدعومة عند مركز كتلتها/ثقلها بمحور وزوجين من المحامل (شكل ٦,١,٩). أي احتكاك في المحامل يُبذل بالقرب من محور دوران الحلقة يُنتج عزماً دورانياً صغيراً وتدور الحلقة بسهولة جدا. إضافة إلى ذلك، ترتكز الحلقة حول مركز ثقلها بحيث لا يُنتج وزنها أي عزم دوراني عليها.

الشيء الوحيد الذي يبذل عزما دورانيا على حلقة الاتزان هو زنبرك لفّ صغير جدا. أحد طرفي هذا الزنبرك مرتبط بالحلقة بينما الآخر مثبّت بجسم الساعة. عندما يكون الزنبرك غير مشوه، فإنه لا يبذل أي عزم دوراني على الحلقة فتكون الحلقة في وضع اتزان. ولكن إذا أدرت الحلقة في أي اتجاه، فإن العزم الدوراني من الزنبرك المشوه سيعمل على إعادتها لوضعها المتزن. بما أن هذا العزم الدوراني الإرجاعي يتناسب مع دوران الحلقة بعيدا عن اتزانها المستقر، فإن حلقة الاتزان وزنبرك اللف يشكلان متذبذباً توافقياً!

بسبب الصفة الدورانية لهذا المتذبذب التوافقي، فإن زمنه الدوري يعتمد على صلابة اللّي لزنبرك اللف – أي مقدار زيادة سرعة عزم الدوران حينما تلويه – وعلى الكتلة الدورانية لحلقة الاتزان. بما أن الزمن الدوري لحلقة الاتزان لا يعتمد على سعة حركته، فإنه يضبط الوقت بشكل رائع. ولأن الجاذبية لا تبذل أي عزم دوراني على حلقة الاتزان، فإن ضابط الوقت هذا يعمل في أي مكان وفي أي اتجاه.

إن المتبقي من ساعة الاتزان مماثل لساعة البندول (شكل ٧,١,٩). بينما تهتز حلقة الاتزان ذهابا وإيابا، فإنها تدفع رافعة تتحكم بدوران عجلة مسننة. يسمح مثبّت متصل بالرافعة للعجلة المسننة بالتقدم بمقدار سن واحدة لكل دورة كاملة من حركة حلقة الاتزان. توصل تروس العجلة المسننة بعقارب الساعة، والتي تتقدم ببطء حينما تدور العجلة.

بما أن ساعة الاتزان متنقلة، فإنها لا تستطيع الحصول على طاقة من سلك ذي ثقل. بدلا من ذلك، فإن لها زنبركاً رئيسياً يبذل عزماً دورانياً على العجلة المسننة. هذا الزنبرك الرئيسي هو سلك من معدن مرن يُخزّن طاقة عند لف (تعبئة) الساعة. تُبقي طاقته حلقة الاتزان مهتزة بثبات ذهابا وإيابا وأيضا تدير عقارب الساعة. بما أن الزنبرك الرئيسي ينحل بينما تدور العجلة المسننة، فإن الساعة تحتاج لفاً (تعبئة) من وقت لآخر. (للتعرف



شكل ٨,١,٩: تتصرف بلورة كوارتز مثل زنبرك له كتلة عند كل طرف. كما أن الكتلتين تتسارعان بالتناوب (أ) باتجاه و(ب) بعيدا عن بعضهما البعض، فإن نصفي البلورة المهتزة يتسارعان بالتناوب (ج) باتجاه و(د) بعيدا عن بعضهما البعض.

على مثال مثير لساعة اتزان، انظر [٢٥]).

تحقق من فهمك #٥: ترفيه ضوئي صغير (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

عندما تضرب ثريا بالمكنسة خطأ، فإن هذا الضوء المعلق سيبدأ بالتأرجح ذهابا وإيابا بزمن دوري منتظم. ما الذي يحدد الزمن الدوري لتذبذبه؟

[٢٥] نشأ الابن والحفيد لعبيد محررين، بينجامين بانيكر (عالم رياضيات وفلكي وكاتب أمريكي - أفريقي، ١٧٣١ - ١٨٠٦م) في مزرعة تبغ في ماريلاند. كان مولعا بالرياضيات والعلوم، وأكمل محدودية تعلمه في المدرسة بكتب مستعارة. بالرغم من أنه يُذكر أكثر بعمله في مجال الفلك وبتجميعه ستة تقاويم، إلا أنه أنتج أيضا إحدى الساعات التي صُنعت بالكامل في أمريكا. مع فقط ساعة جيب مستعارة معه كدليل، صنع بانيكر ساعة اتزانه الخشبية بيديه، باستخدام سكين لتشكيل الأجزاء. حافظت الساعة على دقة الوقت لمدة نصف قرن وأيضا دقت كل ساعة.

الساعات الإلكترونية

إن الدقة الكامنة للبندول وساعات الاتزان محدودة بالاحتكاك، ومقاومة الهواء، والتمدد الحراري لحوالي عشر ثوانٍ كل عام. لكي تعمل بشكل أفضل، يجب على ضابط الوقت في الساعة أن يتفادى هذه العيوب الميكانيكية. لهذا تستخدم العديد من الساعات الحديثة متذبذبات الكوارتز كضابطات لوقتها.

يتكوّن متذبذب الكوارتز من بلورة واحدة من الكوارتز، وهو نفس المعدن الموجود في معظم الرمل الأبيض. مثل العديد من الأجسام الصلبة والسريعة الانكسار، فإن بلورة الكوارتز تتذبذب بقوة بعد ضربها. في الحقيقة، هي متذبذب توافقي لأنها تتصرف مثل زنبرك له كتلتان معلقتان على طرفيه (شكل ٨,١,٩ أ،ب). تتذبذب الكتلتان للداخل وللخارج بشكل متناظر حول مركز كتلتهما المشترك، بزمن دوري محدد فقط بكتل الجسمين وصلابة الزنبرك. في بلورة الكوارتز، الزنبرك هو البلورة ذاتها والجسمان هما نصفاها (شكل ٨,١,٩ ج، د). بما أن القوى على الجسمين تتناسب مع إزاحتهما عن الاتزان، فإنهما متذبذبان توافقيان.



شكل ٩,١,٩: تقع بلورة الكوارتز في هذه الساعة اليدوية داخل أسطوانة فضية في القاع. تُصقل البلورة بعناية لكي تهتز عند تردد محدد، وتحافظ البلورة على دقة الساعة لبضع ثوانٍ في الشهر.

بسبب قساوة بلورة الكوارتز غير الاعتيادية، فإن قوة إرجاع البلورة صلبة جدا. فحتى التشوه الطفيف يؤدي لقوة إرجاع هائلة. بما أن الزمن الدوري لمتذبذب توافقي يتناقص بزيادة صلابة زنبركه، فإن متذبذب الكوارتز الاعتيادي له زمن دوري قصير جدا. تسمى حركته في العادة اهتزازاً بدلا من تذبذب لأن الاهتزاز يدُل على تذبذب سريع في النظام الميكانيكي. التذبذب نفسه هو مصطلح أعم لأي عملية تكرارية ويمكن إطلاقه حتى على عمليات غير ميكانيكية مثل التذبذبات الكهربائية أو الحرارية.

بسبب اهتزاز متذبذب الكوارتز السريع، فإن زمنه الدوري يكون جزءاً صغيراً من الثانية. في العادة نَصِف مثل هذا التذبذب السريع بالتردد - أي عدد الدورات التي يكملها في مقدار محدد من الزمن. وحدة التردد في النظام العالمي للوحدات SI هي دورة - لكل - ثانية، وتسمى أيضا هيرتز (اختصارا Hz) نسبة للفيزيائي الألماني هينرك رودولف هيرتز. الزمن الدوري والتردد هما مقلوبا بعضهما البعض

(الزمن الدوري يساوي 1/التردد والعكس بالعكس) بحيث المتذبذب الذي له زمن دوري 0.001s له تردد 1000Hz.

بما أن البلورة المهتزة لا تنزلق عبر أي شيء أو تتحرك بسرعة خلال الهواء، فإنها تفقد طاقة ببطء وتهتز لفترة زمنية طويلة جدا. وبما أن معامل التمدد الحراري للكوارتز صغير جدا، فإن الزمن الدوري للبلورة مستقل تقريباً عن درجة حرارتها. بزمنه الدوري الثابت بشكل رائع، فإن متذبذب الكوارتز يمكنه أن ينفع كضابط للوقت لساعة عالية الدقة، أي التي تفقد أو تكسب أقل من عُشر الثانية كل عام.

بالطبع، بلورة الكوارتز ليست ساعة متكاملة. مثل البندول وحلقة الاتزان، فإن البلورة تحتاج لشيء ما لإبقائها مهتزة واستخدام ذلك الاهتزاز لتحديد الزمن. بالرغم من أن هذه المهمات يمكن أن تُقضى بشكل ميكانيكي، إلا أن ساعات الكوارتز في العادة إلكترونية. هناك سببان لهذا الاختيار. أولا: اهتزازات البلورة سريعة جدا وصغيرة جدا بحيث يصعب على معظم الأجهزة الميكانيكية أن تجاريها. ثانيا: بلورة الكوارتز هي فعليا إلكترونية بذاتها؛ فهي تستجيب ميكانيكيا للإجهاد الكهربائي وتستجيب كهربائياً للإجهاد الميكانيكي. بسبب هذا الترابط بين سلوكها الميكانيكي والكهربائي، فإن بلورة الكوارتز تعرف كمادة كهروضغطية (piezoelectric) وهي مثالية للساعات الإلكترونية.
تستخدم دوائر الساعة إجهادات كهربائية لإبقاء بلورة الكوارتز مهتزة (شكل ٩،١،٩). تماما مثل ما تُبقي الدفعات المؤقتة بعناية طفلا متأرجحا بشكل لا نهائي على أرجوحة ساحة اللعب، فإن الإجهادات الكهربائية المؤقتة بعناية تُبقي بلورة الكوارتز مهتزة بشكل لا نهائي في حاملها. بما أن البلورة تفقد طاقة قليلة جدا مع كل اهتزازة، فإن مقداراً قليلاً من الشغل مطلوب في كل دورة للمحافظة على اهتزازها.

كما تكتشف الساعة أيضا اهتزازات البلورة كهربائيا. كلما يتحرك نصفاها إلى الداخل أو الخارج، تواجه البلورة إجهاداً ميكانيكياً وتبعث نبضة كهربائية. هذه النبضات يمكنها التحكم بمحرك كهربائي يعمل على تقدُم عقارب الساعة أو يمكنها أن تعمل كمُدخلات لشريحة إلكترونية تقيس الزمن بعدّ النبضات.
إن بلورات الكوارتز المستخدمة في الساعات الحائطية والساعات اليدوية تُقصّ بعناية وتُصقل لكي تهتز بترددات محددة. كلما كانت البلورة أرفع، زادت سرعة اهتزازها - كتلة أقل وقوة إرجاع أصلب. في الواقع، تُضبط هذه البلورات مثل الآلات الموسيقية لكي تتوافق مع متطلبات ساعاتها.

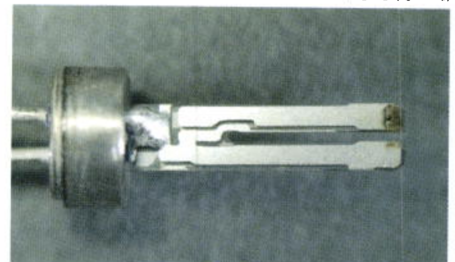
في حين تهتز معظم بلورات الكوارتز الصغيرة جدا ملايين المرات كل ثانية، إلا أن بلورات الساعة اليدوية المعتادة تهتز بتردد 215Hz أو 32,768Hz. هذا التردد المنخفض يمدّ في عمر بطارية الساعة لأن عدّ كل نبضة يستهلك بعضا من طاقة البطارية. لجعل بلورة صغيرة تهتز بهذا البطء، فإن الصانع يقطع معظم مركز البلورة لإضعاف قوة إرجاعها وإبطاء تذبذبها (شكل ١٠،١،٩). يُطلى المتذبذب البلوري الناتج المشابه «للشوكة الرنانة» بمعدن ليسمح للساعة بالتفاعل معه كهربائيا، ثم يُضبط عند تردد 32,768Hz تماما بحرق بعض من كتلة المعدن باستخدام شعاع ليزر.

تحقق من فهمك # ٦: الموسيقى الصاخبة

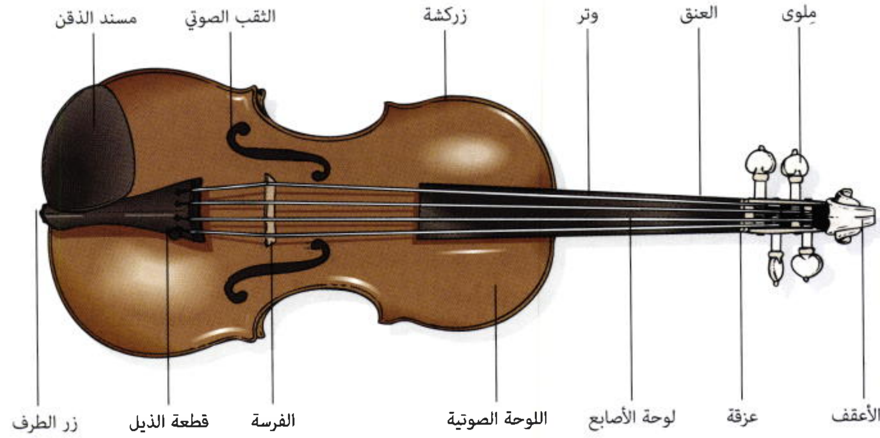
(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

إذا أسقطت قضيباً معدنياً على الأرض، على طرفه، فإنك تسمع نغمة مرتفعة. ماذا يحدُث؟

بإذن لو بلومفيلد



شكل ١٠،١،٩: بلورة ساعة مشكّلة على هيئة شوكة رنانة صغيرة جدا، تهتز تقريبا 32,768 مرة كل ثانية. أُحدثت أثار الحروق على أطرافها عندما ضُبط ترددها الاهتزازي باستخدام شعاع ليزر.



٩-٢ الآلات الموسيقية

الموسيقى هي جزء مهم من التعبير الإنساني. في حين أن ما يتأهل ليكون موسيقى هو مسألة ذوقية، إلا أنه دائما يتضمن صوتاً وفي الغالب يتضمن آلات. في هذا القسم، سوف نفحص الصوت، والموسيقى، والعديد من الآلات: الكمان، والأنابيب الموسيقية، والطبول. كأمثلة لأكثر أنواع الآلات شيوعا، الأوتار، والنفخ، والأسطح، فإن هذا الثلاثي سيساعدنا في فهم العديد من الآلات الأخرى أيضاً.

أسئلة للتفكير

لماذا تكون أوتار درجة الصوت المنخفضة في الكمان أكثر سمكا من أوتار درجة الصوت المرتفعة؟ كيف يمكن لضغط وتر الكمان على لوحة الأصابع أن يغير من درجة صوته؟ لماذا يختلف صوت الكمان عندما يُنقر عنه عندما يسحب بالقوس؟ ما الغرض الذي يحققه جسم الكمان؟ ما الذي يهتز داخل الأنابيب الموسيقية؟ لماذا تكون بعض الأنابيب الموسيقية أطول من بعضها الآخر؟ لماذا تبدو معظم الطبول لا نغمية، وتوفر إيقاعا أكثر من توفيرها لدرجة صوت؟

تجارب يمكن القيام بها

ابحث عن كمان أو قيثارة، أو شدّ وتراً قوياً بين داعمين صلبين. حتى الرباط المطاطي سيجزئ إن لم تجد غيره. انقر الوتر بإصبعك واستمع للنغمة التي يصدرها. يهتز الوتر ذهابا وإيابا عند تردد محدد أو درجة صوت محددة حتى عندما تتناقص سعة حركته تدريجياً. ما هو نوع المتذبذب الذي له هذا السلوك؟

غيّر تردد اهتزاز الوتر بتغيير شده أو طوله. ماذا يحدث عندما تُقصّر طول الوتر أو تمنع جزءا منه عن الحركة؟ ماذا يحدث عندما تزيد من شده بسحبه بإحكام أكبر؟ يمكنك أيضا أن تزيد من كتلة الوتر بلفه بلصق. كيف يؤثر هذا على درجة صوته؟ يمكنك تقليد آلات الأنابيب الموسيقية بالنفخ بلطف عبر فتحة قنينة أو ماصة شراب الصودا. إذا نفخت بشكل صحيح، فإنك ستجعل الهواء داخل القنينة يهتز للأعلى وللأسفل بإيقاع وستسمع نغمة. ماذا يحدث لدرجة صوته عندما تضيف ماء للقنينة أو تضغط الماصة عند نقاط مختلفة؟ لماذا يختلف صوت هذه النغمة عن صوت نغمة الوتر، حتى وإن كانا لهما نفس درجة الصوت؟

أخيرا، تتصرف الطاولة أو الطبق كطبلة عندما تطرق عليها. قارن بين الصوت الذي تصدره مع الذي أصدرته «الآلتان» السابقتان. هل لهذا الصوت درجة؟ ما الذي يميز الأصوات الصادرة من الطاولات والأطباق المختلفة؟

الصوت والموسيقى

لفهم كيفية عمل الآلات الموسيقية، سنحتاج أن نعرف المزيد عن الصوت والموسيقى. في الهواء، يتكون الصوت من موجات كثافة – أي أنماط من الانضغاطات والتخلخلات التي تنتقل بعيداً عن مصدرها بسرعة. عندما يمر بك صوت، يتموج ضغط الهواء في أذنك للأعلى وللأسفل حول الضغط الجوي الطبيعي. حتى وإن كان لهذه التموجات سعات أقل من جزء من المليون من الضغط الجوي، فأنت تسمعها كصوت.

عندما تكون التموجات متكررة، فأنت تسمع نغمة بدرجة صوت مساوية لتردد التموج. درجة الصوت هي تردد الصوت. تمتد درجة صوت مغنٍّ جهير الصوت من 80Hz إلى 300Hz، بينما تمتد درجة حاد الصوت من 300Hz إلى 1100Hz. يمكن أن تنتج الآلات الموسيقية نغمات في مدى أوسع بكثير من درجات الصوت، لكننا نستطيع سماع فقط التي تكون بين 30Hz و20,000Hz، وهذا المدى يضيق مع تقدمنا في السن.

تتركب معظم الموسيقى حول فواصل (مسافات موسيقية) – وهي نسبة التردد بين نغمتين مختلفتين. توجد هذه النسبة بقسمة تردد النغمة الأولى على الأخرى. إن سمعنا حسّاس بشكل خاص للفواصل، فزوجان من النغمات عند فواصل متساوية تبدوان متماثلة لبعضهما البعض. على سبيل المثال، تبدو زوجان من النغمات عند 440Hz و 660Hz متماثلة لزوجين عند 330Hz و 495Hz لأن كليهما لهما فاصلة 3/2.

الفاصلة 3/2 مريحة لمعظم الآذان وهي شائعة في الموسيقى الغربية، حيث تسمى خُمساً. الخُمس هو الفاصلة بين كلمتي «المعْ» في بداية الأغنية «المع، المع، كالأقمار». إذا كانت أذنك جيدة، فيمكنك أن تبدأ بأي نغمة لالمع الأولى وستجد بسهولة النغمة الثانية، موجودة عند 3/2 من تردد الأولى. تسمع أذنك هذه النسبة 3/2 بين الترددين.

إن أهم فاصلة في كل الموسيقى تقريباً هي 2/1 أو الثمان. النغمات التي تختلف بمعامل قدره 2 في التردد تبدو متماثلة لآذاننا بحيث نظن في الغالب أنهما نفس الشيء. عندما يُغني الرجال والنساء سوية «في تناغم كلي» فإنهم في الغالب يغنون بفرق مقداره ثمان أو ثمانيْن، وتكاد تكون الفروق في النغمات – والتي دائما بمعامل 2 أو 4 بالنسبة للتردد، غير ملاحظة.

إن الثمان مهم جدا حيث أنه يُرتب المدى الكامل لدرجات الصوت المسموعة. معظم التداخلات اللطيفة للنغمات في الموسيقى تحدث في فواصل أقل من الثمانية، أي أقل من معامل 2 في التردد. ولذا فإن معظم الأعراف تبني موسيقاها حول الفواصل التي تقع داخل الثمانية الواحدة، مثل 5/4 و 3/2. إنهم يختارون درجة صوت قياسية معينة ثم يخصصون علامات موسيقية عند فواصل محددة من درجة الصوت القياسية. هذا الترتيب يتكرر في ثمانيات أعلى أو أدنى من درجة الصوت القياسية لتكوين سُلم كامل من العلامات (لتاريخ السلالم الموسيقية، انظر ◊[٣])

إن السلم الموسيقي المستخدم في الموسيقى الغربية مرتب حول علامة تسمى A4 أو كونسرت A والتي لها درجة صوت قياسية مقدارها 440 Hz. في الفواصل 9/8 و5/4 و 4/3 و3/2 و5/3 و15/8 فوق A4 تقع العلامات الستة B4 وC#5 وD5 وE5 و F#5 وG#5. تُبنى مجموعات مماثلة من ست علامات فوق الـ A5 (880Hz)، والتي لها ضعف تردد الـ A4، وأيضا فوق A3 (220Hz)، والتي لها نصف تردد الـ A4. في الحقيقة، هذا النمط يتكرر فوق A1 (55Hz) إلى A8 (7040Hz).

في الواقع، الموسيقى الغربية مبنية حول 12 علامة و11 فاصلة تقع داخل ثمانية واحدة. هناك خمس فواصل إضافية تفسّر العلامات الخمسة الإضافية، Bb4 وC5 وD#5 وF5 وG5. وأيضا ليس بالصحيح أن كل علامة مبنية بشكل خاص على فاصلتها عن الـ A4. في حين تظل A4 عند 440Hz، إلا أن درجات صوت العلامات الإحدى عشر الأخرى تم تعديلها قليلا بحيث تكون عند فواصل مشوقة وممتعة عن بعضها البعض وعن

◊[٣] بالإضافة لمساهماته في علم الرياضيات، والهندسة، والفلك، فإنه من المحتمل أن عالم الرياضيات اليوناني فيثاغورس (ca 580 – 500 B.C.) كان أول شخص استخدم الرياضيات لإيجاد علاقة بين الفواصل الموسيقية ودرجات الصوت وأطوال الأوتار المهتزة. وضع هو وتابعوه البنية الأساسية للسلم الموسيقي المستخدم في معظم الموسيقى الغربية.

A4 أيضاً. أدى هذا التعديل في درجات الصوت للسلم الموسيقي المعتدل والذي هو أساس الموسيقى الغربية لبضعة القرون الأخيرة.

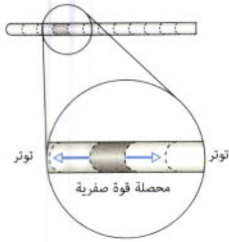
تحقق من فهمك # ١: ليلة في الأوبرا (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

يمكن للصوت الغنائي الاعتيادي أن يُغطي مدى حوالي ثمانيتين، على سبيل المثال من C4 إلى C6. ما هو اتساع مدى هذه الترددات؟

وتر الكمان المهتز

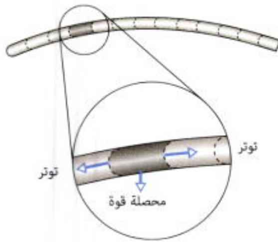
تبدأ النغمات الناتجة عن كمان كاهتزازات في أوتاره. لكن هذه الأوتار رخوة وعديمة الشكل بذاتها وتعتمد على جسم الكمان وعنقه الصلبين في تشكيلها. يُخضع الكمان أوتاره إلى توتر – أي قوى متجهة إلى الخارج تعمل على تمديدها – وهذا التوتر يُعطي كل وتر شكل اتزان: خط مستقيم.

لرؤية أن وتر الكمان المستقيم هو في حالة اتزان، انظر له وكأنه مكوّن من العديد من القطع المستقلة المتصلة ببعضها في سلسلة (شكل ١,٢,٩). يبذل التوتر زوجاً من القوى للخارج على كل قطعة في الوتر؛ القطع المجاورة لها تجذبها نحوها. بما أن توتر الوتر متجانس، فإن محصلة هاتين القوتين للخارج هي صفر؛ أي لهما مقداران متساويان ولكنهما يشيران في اتجاهين متعاكسين. بمحصلة قوة صفرية على كل من قطعه، فإن الوتر المستقيم يكون في حالة اتزان.



شكل ١,٢,٩: يمكن النظر لوتر الكمان المشدود على أنه يتكوّن من العديد من القطع المستقلة. عندما يكون الوتر مستقيما، فإن القوتين المبذولتين على قطعة معينة من قِبل القطع المجاورة تلغي بعضها البعض تماما.

ولكن عندما يكون الوتر مقوسا، فإن محصلة أزواج القوى إلى الخارج لم تعد صفرا (شكل ٢,٢,٩). بالرغم من أن هذه القوى الخارجية ما زال لها نفس المقدار، إلا أنها الآن تشير في اتجاهات مختلفة بعض الشيء. نتيجة لذلك، فإن كل قطعة تواجه محصلة قوة صغيرة. إن محصلات القوى على قطع الوتر هي قوى إرجاع لأنها تعمل على إعادة استقامة الوتر. إذا قمت بتشويه الوتر ثم أطلقته، فإن قوى الإرجاع هذه ستتسبب في اهتزاز الوتر حول شكل اتزانه المستقيم برنين طبيعي. ولكن قوى إرجاع الوتر متميزة: كلما زدت من تقوّس الوتر، أصبحت قوة الإرجاع على قطعه أقوى. في الحقيقة، قوى الإرجاع هي قوى شبيهة بالزنبرك – تزيد بالتناسب مع تشوه الوتر – لذا فإن الوتر هو شكل من أشكال المتذبذب التوافقي!



شكل ٢,٢,٩: عندما يكون وتر الكمان متقوسا، فإن القوتين المبذولتين على قطعة معينة من قِبل القطع المجاورة لا تشير في اتجاهات معاكسة تماما ولا توازن بعضها البعض. تواجه القطعة محصلة قوة.

في الحقيقة، الوتر أكثر تعقيدا من البندول أو حلقة الاتزان. فيمكنه أن يهتز في العديد من الأنماط المتميزة أو أنماط أساسية من التشوه، وكل نمط له زمنه الدوري الخاص باهتزازه. ومع هذا، يحتفظ الوتر بأهم خاصية للمتذبذب التوافقي: الزمن الدوري لكل نمط اهتزازي لا يعتمد على سعته. وهكذا فإن درجة صوت وتر الكمان لا تعتمد على شدة اهتزازها. فكّر كيف يمكن أن يكون العزف على الكمان صعبا إذا كانت درجة صوته تعتمد على جهارته!

إن وتر الكمان له اهتزاز أبسط: نمط اهتزازه الأساسي. في هذا النمط، يتقوّس الوتر بأكمله بالتبادل نحو اتجاه أو آخر (شكل ٣,٢,٩). تبلغ طاقته الحركية ذروتها بينما يتحرك بسرعة خلال شكل اتزانه المستقيم، وتبلغ طاقته الكامنة ذروتها (الطاقة الكامنة المرنة في الوتر) عندما يتوقف ليغير اتجاه حركته. تتحرك نقطة الوتر المنصفة له لأقصى ما يمكن (بطن الاهتزاز) بينما تظل أطرافه مثبتة (عُقد الاهتزاز). في كل لحظة، يكون شكل الوتر هو المنحنى التدرجي لدالة الجيب المثلثية.



شكل ٣,٢,٩: الوتر المهتز بين نقطتين مثبتتين يكون في نمطه التذبذبي الأساسي. يتحرك جميع الوتر سوية، فيسير للأعلى وللأسفل كمتذبذب توافقي واحد.

في هذا النمط الأساسي، يتصرف الوتر كمتذبذب توافقي واحد. وكما هو في أي متذبذب توافقي، فإن الزمن الدوري لاهتزازه يعتمد فقط على صلابة قوى إرجاعه وعلى قصوره. فزيادة صلابة وتر الكمان أو تقليل كتلته كلاهما يسرّعان اهتزازه الأساسي ويزيدان من درجة صوته الأساسية.

للكمان أربعة أوتار، كلٌ بصلابته وكتلته الخاصة به وبالتالي يكون له درجة صوت أساسية خاصة به. في الكمان المُضبط، تكون العلامات التي تنتجها هذه الأوتار G3 (196Hz)، وD4 (294Hz)، وA4 (440Hz)، وE5 (660Hz). الوتر G3، والذي يهتز ببطء، هو ذو الكتلة الأكبر. في العادة يصنع من الأحشاء، ويلف بسلك من المعدن الثقيل. من ناحية أخرى، فإن وتر E5 يجب أن يهتز بسرعة كبيرة ويحتاج أن يكون له كتلة منخفضة. في العادة يكون سلكاً فولاذياً رفيعاً.

تقوم بضبط الكمان بتعديل التوتر في أوتاره، باستخدام مفاتيح في رقبته ومعدلات للتوتر في مشطه. إن شد الوتر يزيد من تصلبه بزيادة كل من القوى المتجهة للخارج المؤثرة على قطعه وكذلك محصلة القوى التي تواجهها أثناء التشوه. بما أن درجة الحرارة والزمن يمكنهما تغيير توتر الوتر، فيجب أن تضبط كمانك دائماً قبل حفل موسيقي.

تعتمد درجة صوت الوتر الرئيسية على طوله أيضاً. فتقصير الوتر يجعله أكثر صلابة ويقلل من كتلته، فترتفع درجة صوته. يحدث ذاك التصلب لأن الوتر الأقصر يتقوّس بحدة أكبر عندما يُزاح عن اتزانه وبالتالي يعرّض قطعه لمحصلة قوى أكبر. هذا الاعتماد على الطول يسمح لك برفع درجة صوت الوتر بضغطه على لوحة العفق في رقبة الكمان وتقصيره فعلياً. يتضمن جزء من مهارة عازف الكمان معرفة أين يضغط الوتر بالتحديد على لوحة العفق من أجل إصدار نغمة معينة.

إذا كان تقوّس الوتر المتذبذب في نمطه الرئيسي يذكّرك بموجة، فذلك لأنه فعليا موجة. هو موجة ميكانيكية - حركات طبيعية لجسم ممتد حول شكل أو وضع اتزانه المستقر. الجسم الممتد هو شيء مثل وتر، أو عصا، أو سطح بحيرة والذي له العديد من الأجزاء التي تتحرك باستقلال محدود. بما أن أجزاءه تؤثر على بعضها البعض، فإن الجسم الممتد باتزان مستقر يوضح حركات طبيعية مثيرة تتضمن أجزاء كثيرة تتحرك في الوقت نفسه؛ أي يوضح موجات ميكانيكية.

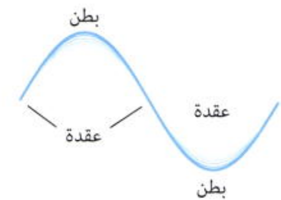
بقطعه المترابطة اللامحدودة وبشكل اتزانه المستقر، يُبدي وتر الكمان مثل هذه الموجات. ونمط الوتر الرئيسي هو في الخصوص موجة بسيطة، هو موجة موقوفة (مستقرة) - أي موجة تظل فيها كل العقد والبطون في مكانها. لا يتغير الشكل الأساسي للموجة الموقوفة مع الزمن، بل يتحرك للأعلى وللأسفل بإيقاع عند تردد خاص وسعة خاصة - أي ذروة مدى حركتها. والأكثر أهمية، أن الموجة الموقوفة لا تسير على طول الوتر.

بالرغم من أن هذه الموجة تمتد على طول الوتر، إلا أن تذبذبها المقترن عمودي على الوتر وبالتالي عمودي على الموجة ذاتها. إن الموجة التي يكون تذبذبها الأساسي عموديا على الموجة ذاتها تسمى موجة مستعرضة. الموجات في الأوتار، والطبول، وعلى سطح الماء جميعها موجات مستعرضة.

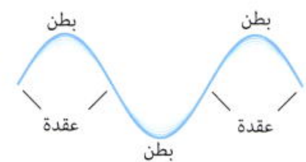
تحقق من فهمك #٢: هل تشعر بالتوتر؟ (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

طريقة معتادة لتحديد التوتر في وتر هي نقره والاستماع لسرعة اهتزازه. لماذا تقيس هذه الطريقة التوتر؟

النمط التوافقي الثاني



النمط التوافقي الثالث



شكل ٤،٢،٩: وتر متذبذب بين نقطتين مثبتتين في نمطه التوافقي الثاني والثالث. يهتز الوتر كجزئيتين أو ثلاثة أجزاء، مكملة الدورات في ضعفي أو ثلاثة أضعاف زمن التردد الأساسي، على التوالي.

توافقيات وتر الكمان

إن النمط الاهتزازي الأساسي ليس هو الطريقة الوحيدة التي يمكن لوتر الكمان أن يهتز بها. للوتر أيضا أنماط اهتزازية عليا والتي يهتز فيها الوتر كسلسلة من الأوتار الأقصر المتقوّسة في اتجاهات متبادلة (شكل ٤،٢،٩). كل من هذه الأنماط الاهتزازية العليا هي موجة موقوفة أخرى، لها شكل ثابت يتحرك للأعلى وللأسفل بإيقاع عند ترددها المستقل وسعتها المستقلة.

على سبيل المثال، يمكن للوتر أن يهتز كجزئين من نصف الوتر يتقوسان في اتجاهين متعاكسين مفصولة بعقدة اهتزازية غير متحركة. في هذا النمط، لا يهتز وتر الكمان كأنصاف أوتار فحسب، بل لها درجة صوت نصف وتر أيضا. من المدهش أن درجة صوت نصف الوتر تلك هي بالضبط ضعف درجة صوت الوتر الكامل (أي الأساسية)! بالعموم، يتناسب التردد الاهتزازي للوتر عكسياً مع طوله، فتنصيف طوله يضاعف تردده. تسمى الترددات التي هي مضاعفات صحيحة من درجة الصوت الأساسية توافقيات، لذا فإن اهتزاز نصف الوتر هذا يحدث عند درجة الصوت التوافقية الثانية وتُسمى النمط التوافقي الثاني.

يمكن لوتر الكمان أن يهتز أيضا كثلاثة أثلاث وتر، بتردد هو ثلاثة أضعاف التردد الأساسي. الفاصلة بين درجة الصوت التوافقية الثالثة هذه ودرجة الصوت الأساسية هي ثمانية وخُمس (1/2 مضروبا بـ 2/3). إجمالا، يبدو الاهتزاز الأساسي وتوافقياته الثانية والثالثة لطيفة جدا سوية.

في حين يمكن لوتر الكمان أن يهتز في توافقيات أعلى من ذلك، إلا أن الأهم هو أن الوتر في الغالب يهتز في أكثر من نمط في الوقت نفسه. مثلا، يمكن لوتر الكمان المهتز في نمطه الأساسي أن يهتز أيضاً في توافقيته الثانية ويُصدر نغمتين في الوقت ذاته.

إن التوافقيات مهمة لأن نقر الكمان بالقوس يثير العديد من أنماطه الاهتزازية. لذا فإن صوت الكمان مزيج ثري من النغمة الأساسية والتوافقيات. هذا المزيج من النغمات يُعرف بالجرْس الموسيقي وهو خاصية للكمان، ولهذا فإن الآلة التي تُصدر مزيجاً آخر لا تبدو مثل الكمان.

عندما يهتز وتر كمان في أنماط متعددة في الوقت نفسه، فإن شكله وحركته معقدتان. تتجمع الموجات الموقوفة المستقلة فوق بعضها البعض، في عملية تعرف بالتراكب. كل نمط اهتزازي له سعته الخاصة وبالتالي مساهمته الحجمية الخاصة لجرْس الوتر. في حين تتواجد هذه الموجات المستقلة سوية بشكل جميل على الوتر، بدون أي تأثير من إحداها على الأخرى تقريباً، فإن شكل الوتر الإجمالي المشوه هو الآن تراكب أشكال الموجات المستقلة. هذا الشكل الإجمالي ليس معقداً جدا فحسب، بل إنه يتغيّر بشكل كبير مع الزمن. ذلك لأن موجات التوافقيات المختلفة تهتز عند ترددات مختلفة وتتغير تراكباتها بتغير تردداتها. إن الموجة الكلية للوتر ليست موجة موقوفة ويمكن حتى لهيئتها أن تتحرك على طول الوتر!

تحقق من فهمك # ٣: التأرجح للأعلى وللأسفل سوية (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

عندما يقوم شخصان بأرجحة حبل قفز طويل، فإنه يمكنهما أن يجعلاه يتأرجح كقوس واحد أو كنصفي حبل متقوسين في اتجاهين متعاكسين. لجعل الحبل يتأرجح كنصفي حبل، فإنه يجب إدارته بشكل أسرع أو بتوتر أقل. لماذا؟

عزف ونقر وتر الكمان

تعزف الكمان بسحب قوس عبر أوتاره. يتكوّن القوس من شعر حصان، مشدود بعصا خشبية. شعر الحصان خشن ويبذل قوى احتكاك على الأوتار بينما يتحرك عبرها. لكن الأكثر أهمية أن شعر الحصان يبذل قوى احتكاك ساكن أكبر بكثير من قوى احتكاك الانزلاق.

بينما تحتك شعور القوس عبر وتر، فإنها تُمسك بالوتر وتدفعه إلى الأمام باحتكاك سكوني. بعد حين تتغلب قوة إرجاع الوتر على الاحتكاك الساكن، وفجأة يبدأ الوتر بالانزلاق للخلف عبر الشعور. بما أن الشعور تبذل القليل من احتكاك الانزلاق، فإن الوتر يُكمل نصف دورة اهتزازية بسهولة. لكن بينما يتوقف لعكس اتجاهه، فإن الشعور تُمسك بالوتر مرة أخرى وتبدأ بدفعه إلى الأمام. تتكرر هذه العملية مرة بعد أخرى.

كلما يدفع القوس الوتر إلى الأمام، فإنه يبذل شغلاً على الوتر ويضيف طاقة لأنماط الوتر الاهتزازية. هذه العملية هي مثال لانتقال الطاقة الرنيني، والتي يمكن عنده لقوة بسيطة تبذل شغلا متزامنا مع رنين طبيعي أن تنقل كمية كبيرة من الطاقة لذلك

الرنين. ومثل ما يمكن للدفعات اللطيفة والمؤقتة بعناية أن تجعل الطفل يتأرجح عاليا على أرجوحة ساحة اللعب، كذلك يمكن للدفعات اللطيفة والمؤقتة بعناية من القوس أن تجعل الوتر يهتز بقوة في الكمان. يمكن لدفعات مماثلة أن تتسبب في اهتزاز أجسام أخرى بقوة، وخاصة كأس الزجاج الكريستالية (شكل ٥,٢,٩) وجسر مضيق تاكوما بالقرب من مدينة سياتل بولاية واشنطن (٦,٢,٩). إن استجابة كأس الزجاج لنغمة معينة هي أيضا مثال للاهتزاز المتجانس - انتقال الطاقة الاهتزازية بين نظامين لهما تردد اهتزازي مشترك.

ستيف برونستاين\بنك الصور\صور غيتي



شكل ٥,٢,٩: انتقال الطاقة الرنيني يجعل من الممكن للصوت أن يُحطم كأساً زجاجية كريستالية. عندما يدفع الصوت على الزجاج بإيقاع، فإن الصوت ينقل ببطء طاقة إلى الكأس، إلى أن تتحطم في النهاية. بما أن الصوت يجب أن يكون مرتفعا جدا وعند تردد رنين الكأس بالضبط، فإن مغني الأوبرا المتميزين فقط هم الذين يستطيعون كسر كأس الزجاج الكريستالية.

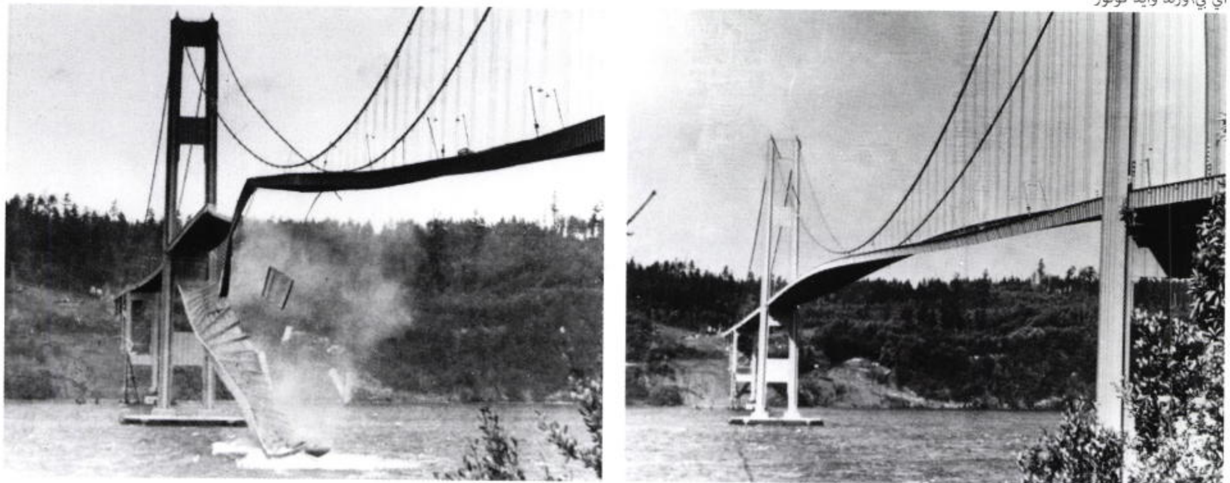
إن مقدار الطاقة التي يضيفها القوس لكل نمط اهتزازي يعتمد على موضع عبوره بوتر الكمان.عندما تحرك القوس على الوتر في الموضع المعتاد، فإنك تنتج اهتزازاً أساسياً قوياً ومقداراً بسيطاً من كل توافق آخر. سحب القوس بالقرب من منتصفه يقلل من تقوّس الوتر، ويُضعف من اهتزازاته التوافقية، ويعطيه صوتاً أكثر رخامة. سحب القوس بالقرب من طرفه يزيد من تقوّس الوتر، ويقوّي اهتزازاته التوافقية ويعطيه صوتاً أكثر ابتهاجا.

يعتمد صوت وتر كمان منقور على المحتوى التوافقي أيضاً وبالتالي على موضع نقر الوتر. لكن هذا الصوت يختلف تماما عن صوت سحب الوتر بالقوس. يقع الاختلاف في غشاء الصوت - أي الطريقة التي يتطور بها الصوت مع الزمن. يمكن أن نتصور هذا الغشاء بأن له ثلاثة أزمنة دورية: استهلال ابتدائي، وثبات متوسط، واضمحلال نهائي. غشاء الوتر المنقور هو استهلال مفاجئ يتبعه مباشرة اضمحلال تدريجي. على النقيض من ذلك، غشاء وتر مسحوب بقوس هو استهلال تدريجي، فثبات مستقر، ثم اضمحلال تدريجي. نتعلم تمييز الآلات الفردية ليس فقط بمحتواها التوافقي بل أيضا بأغشيتها الصوتية.

تحقق من فهمك #٤: ما هذا الطنين؟ (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

في بعض الأحيان تسبب النغمة الصادرة من آلة موسيقية أو نظام سمعي في بدء بعض الأجسام في الغرفة بالاهتزاز بصوت مرتفع. لماذا يحدث هذا؟

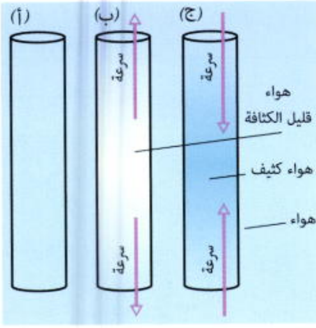
أي بي\ورلد وايد فوتوز



شكل ٦,٢,٩: انهار جسر مضيق تاكوما في نوفمبر عام ١٩٤٠م، نتيجة لانتقال الطاقة الرنيني بين الرياح وسطح الجسر. بعد بنائه بقليل، بدأ جسر السيارات بإظهار رنين طبيعي غير اعتيادي جعل سطحه يميل ذهابا وإيابا بحيث كان يرتفع أحد المسارات بينما الثاني ينخفض. أثناء عاصفة، قامت الرياح بإضافة طاقة ببطء لهذا الرنين إلى أن مزّق الجسر نفسه.

اهتزاز هواء أنبوب آلة الأورغن الموسيقية

مثل الكمان، يستخدم أنبوب آلة الأورغن اهتزازات لإصدار صوت. ولكن اهتزازاته تحدث في الهواء نفسه. أنبوب الأورغن هو في الأساس أسطوانة مجوفة، مفتوحة في كلا الطرفين وممتلئة بالهواء. بما أن ذلك الهواء معزول، فيمكن لضغطه أن يتقلب للأعلى وللأسفل بالنسبة للضغط الجوي ويمكنه أن يظهر رنينا طبيعيا.



شكل ٧,٢,٩: في أنبوب مفتوح من الطرفين (أ)، يهتز الهواء للداخل والخارج حول منتصف الأنبوب. (ب) في نصف دورة يتحرك الهواء إلى الخارج ويكوّن منطقة ضغط منخفض في المنتصف و(ج) وفي نصف دورة يتحرك الهواء إلى الداخل ويكوّن منطقة ضغط مرتفع هناك.

يتحرك الهواء في نمطه الاهتزازي الأساسي بالتبادل نحو مركز الأنبوب وبعيداً عنه (شكل ٧,٢,٩)، مثل جسمين مرتبطين بزنبرك. حينما يتحرك الهواء باتجاه مركز الأنبوب، ترتفع الكثافة هناك ويتولّد عدم اتزان في الضغط. بما أن الضغط عند مركز الأنبوب أعلى منه عند أطرافه، فإن الهواء يتسارع بعيدا عن المركز. بعد حين يتوقف الهواء عن التحرك إلى الداخل ويبدأ بالتحرك إلى الخارج. حينما يتحرك الهواء بعيدا عن مركز الأنبوب، تنخفض الكثافة هناك ويحدث عدم اتزان عكسي في الضغط. بما أن الضغط عند مركز الأنبوب أقل منه عند أطرافه، فإن الهواء الآن يتسارع نحو المركز. في نهاية الأمر يتوقف عن التحرك إلى الخارج ويبدأ بالتحرك إلى الداخل، وتتكرر الدورة. تصل طاقة الهواء الحركية لذروتها كلما يندفع خلال ذلك الاتزان، وتصل طاقته الكامنة (الطاقة الكامنة الضغطية في الهواء) ذروتها كلما يتوقف للاستدارة.

يهتز هذا الهواء حول اتزان مستقر لكثافة وضغط جوي منتظم، ومن الواضح أنه يواجه قوى إرجاع. يجب أن لا يكون أمرا مفاجئا أن قوى الإرجاع هذه مثل الزنبرك وأن عمود الهواء هو متذبذب توافقي آخر. هكذا، يعتمد تردده الاهتزازي فقط على صلابة قوى إرجاعه وعلى قصوره. إن تصلب الهواء أو تقليل كتلته كلاهما يسرعان من اهتزازه ويزيدان من درجة صوته.

تعتمد هذه الخصائص على طول أنبوب الأورغن. إن الأنبوب الأقصر لا يحتجز كتلة هواء أقل مقارنة بالأنبوب الأطول فحسب، بل أيضا يوفّر معارضة أكثر صلابة لأي حركة للهواء لداخل وخارج ذلك الأنبوب. مع حيز أقل في الأنبوب الأقصر، يرتفع ضغط الهواء داخله وينخفض بشكل مفاجئ أكثر، مؤديا لقوى إرجاع أكثر صلابة على الهواء المتحرك. معاً، تجعل هذه التأثيرات الهواء في الأنبوب الأقصر يهتز أسرع من الهواء في الأنبوب الأطول. في العموم، يتناسب التردد الاهتزازي لأنبوب الأورغن عكسيا مع طوله.

من المؤسف أن كتلة الهواء المهتز في الأنبوب تزيد أيضا بزيادة كثافة الهواء المتوسطة، بحيث حتى التغير البسيط في درجة الحرارة أو الطقس سيغيّر درجة صوت الأنبوب. من حسن الحظ، تتغير جميع الأنابيب سوية بحيث يستمر الأورغن في إصدار صوت متناغم. ومع هذا، قد يبدو هذا التغيّر ملحوظا عندما يكون الأورغن جزءا من أوركسترا.

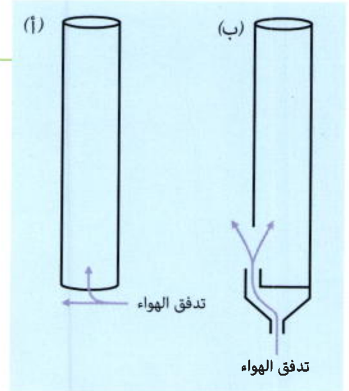
كما قد تظن، فإن النمط الاهتزازي الأساسي للهواء في أنبوب الأورغن هو موجة موقوفة أخرى. الهواء في الأنبوب هو جسم ممتد في وضع اتزان مستقر، والاضطراب المرتبط بنمطه الاهتزازي الأساسي له شكل بسيط لا يتغير مع الزمن؛ بل ببساطة يتحرك للأعلى وللأسفل بشكل متناغم.

ولكن شكل الموجة الآن في هواء الأنبوب يتعلق بانضغاطات وتخلخلات ذهابا وإيابا، وليس بإزاحات من جنب لآخر كما هو حاله في وتر الكمان. في الحقيقة، كل التذبذبات المرتبطة بالموجة هي على طول الأنبوب وبالتالي على طول الموجة نفسها. الموجة التي يكون فيها التذبذب الأساسي موازيا للموجة ذاتها تسمى موجة طولية. الموجات في الهواء، بما في ذلك تلك التي داخل أنابيب الأورغن والآلات النفخية الأخرى والموجات الصوتية في الهواء المفتوح، جميعها موجات طولية.

تحقق من فهمك # ٥: الأورغن الشعبي

(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

إذا نفخت عبر قنينة مشروب صودا، فإنها ستصدر نغمة. لماذا إضافة ماء للقنينة ترفع من درجة صوت تلك النغمة؟



شكل ٨,٢,٩: (أ) الهواء المنفوخ عبر أسفل أنبوب مفتوح سيتبع أي هواء آخر يتحرك إلى داخل الأنبوب. إذا كان الهواء داخل الأنبوب يهتز، فإن هذا التأثير سيضيف طاقة لذلك الاهتزاز. (ب) إن الفتحة السفلية في أنبوب الأورغن تُقطع في جانبه لأسباب عملية.

عزف أورغن أنبوبي

يستخدم الأورغن نقل الطاقة الرنيني لجعل الهواء يهتز في الأنبوب. يبدأ هذا الانتقال بنفخ الهواء عبر فتحة الأنبوب السفلية (شكل ٨,٢,٩ أ)، بالرغم من أنه لأسباب عملية توجد هذه الفتحة السفلية في جانب الأنبوب (شكل ٨,٢,٩ ب). حينما يتدفق الهواء عبر الفتحة، فإنه ينحرف بسهولة ويميل لاتباع أي هواء يتحرك لداخل أو لخارج الأنبوب. إذا كان الهواء داخل الأنبوب يهتز، فإن الهواء الجديد سيتبعه في تزامن تام ويقوّي الاهتزاز.

إن عملية المتابعة هذه فعّالة في تحسين الاهتزازات لدرجة أنها يمكنها أيضا أن تُنشئ اهتزازات من الضوضاء العشوائية التي تكون موجودة دائما في الأنبوب. هكذا يبدأ الصوت عندما تبدأ مضخة الأورغن بنفخ هواء خلال الأنبوب. بمجرد أن يبدأ الاهتزاز، فإنه يكبر بسرعة في السعة إلى أن تغادر الطاقة الأنبوب كصوت وحرارة بنفس السرعة التي تصل بها عن طريق الهواء المضغوط. كلما زاد الهواء الذي ينفخه الأورغن عبر الأنبوب كل ثانية، زادت القدرة التي يُوصلها للأنبوب وارتفع صوت الاهتزاز.

مثل وتر الكمان، يمكن لأنبوب الأورغن أن يدعم أكثر من نمط واحد من الاهتزازات. في نمطه الاهتزازي الأساسي، يهتز كامل عمود الهواء في الأنبوب سوية. في الأنماط الاهتزازية العليا، يهتز هذا العمود من الهواء كسلسلة من الأعمدة الهوائية الأقصر التي تتحرك في اتجاهات متبادلة. إذا كان للأنبوب عرض ثابت، فإن هذه الاهتزازات تحدث عند توافقيات للاهتزاز الأساسي. عندما يهتز عمود الهواء كنصفين، فإن درجة صوته هي تماما ضعف درجة صوت النمط الأساسي. عندما يهتز كثلاثة أثلاث، فإن درجة صوته هي تماما ثلاثة أضعاف درجة صوت النمط الأساسي. وهكذا.

لكن عمود الهواء داخل الأنبوب يمكنه أن يهتز بأكثر من نمط واحد آنيا. كما هو الحال في وتر الكمان، فإن الموجات الموقوفة تتراكب وتنتج النغمة الأساسية والنغمات التوافقية سوية. شكل أنبوب الأورغن والموضع الذي يُنفخ الهواء عبره يُحددا محتوى توافقيات الأنبوب وبالتالي جرسه. يمكن لأنابيب مختلفة أن تُحاكي آلات مختلفة. ليبدو الصوت كآلة الفُلُوت، يجب أن يُصدر الأنبوب النغمة الأساسية في الأكثر ويُبقي التوافقيات منخفضة الصوت. ليبدو الصوت كآلة الكلارينيت، فإنه يجب أن يكون صوت توافقياتها مرتفعاً أكثر بكثير. حجم أنبوب الأورغن دائما يُبنى ببطء أثناء الاستهلال، فلا يمكنه أن يظهر كوتر منقور. ولكن المصمم الذكي يمكنه أن يجعل الأورغن يُحاكي مدى مدهشاً من الآلات.

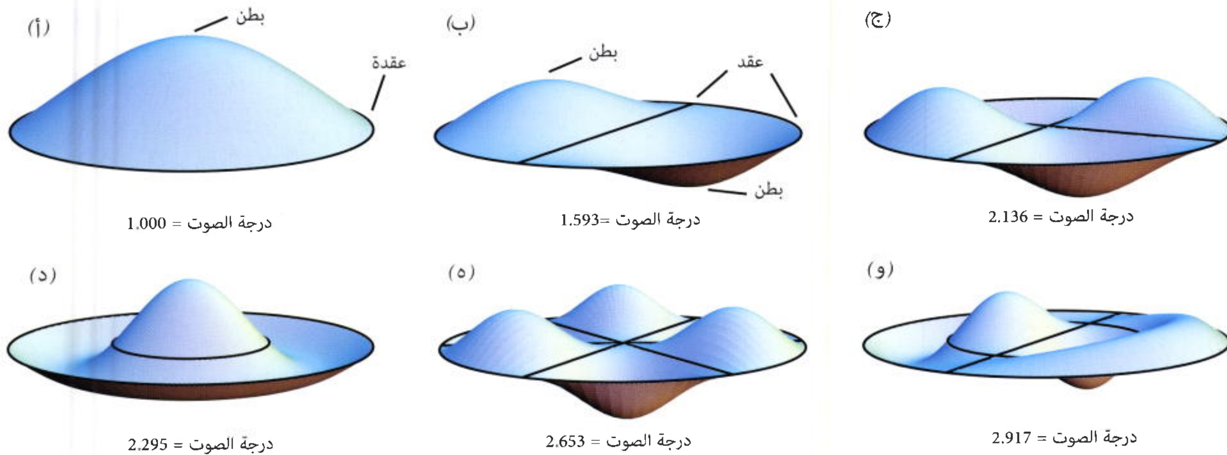
تحقق من فهمك # ٦: قوس عابر (للإجابة، انظر صفحة ٣٨٩)

لجعل الهواء في قنينة شراب صودا يهتز، يجب أن تنفخ عبر فتحة القنينة. لماذا لا ينفع النفخ إلى داخل فتحة القنينة؟

سطح الطبل المهتز

بعد فحص أوتار الكمان وأنابيب الأورغن، قد يبدو أن الطبول لا تقدم شيئاً جديداً. لكن في حين سطح الطبل هو جسم ممتد آخر باتزان مستقر وقوى إرجاع شبيهة بالزنبرك، فإن اهتزازاته النغمية الإضافية لديها اختلاف مهم: هي ليست توافقية.

إن أوتار الكمان وأنابيب الأورغن هي فعليا أجسام أحادية البُعد، تنقسم بسهولة إلى أنصاف أجسام أو أثلاث أجسام والتي عند ذلك تهتز عند درجة صوت توافقية ثانية أو ثالثة. سوية مع العديد من الآلات الأحادية البُعد في الأوركسترا أو الفرقة الغنائية، فإنها تمتزج بتجانس عندما يُعزف عليها نفس درجة الصوت الأساسية لأنها تتشارك في نفس التوافقيات.



شـكل ٩،٢،٩: الأنماط الاهتزازية لدرجات الصوت السـتة الدنيا لجلدة الطبل، بما في ذلك (أ) النمط الاهتزازي الأساسي و(ب-و) أنماط النغمات الإضافية. درجات الصوت موضحة بالنسبة لدرجة الصوت الأساسية.

لكن بما أن جلدة الطبل هي فعليا بُعدان، فهي لا تنقسم بسهولة لقطع تشابه جلدة الطبل الكاملة. نتيجة لذلك، درجات صوت نغماتها الاهتزازية الإضافية ليس لها علاقة بسيطة بدرجة صوتها الأساسية. تبرز آلة النقّاريّة أو الدفّيّة (دفّان أو أكثر ينقر عليها عازف واحد) بالنسبة للآلات الأخرى جزئيا بسبب درجات صوت النغمات الإضافية الفريدة.

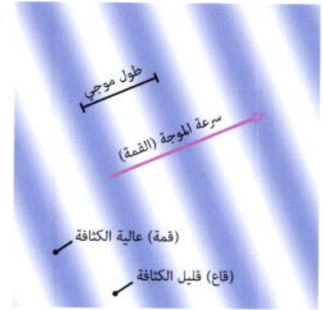
يوضح الشكل (٩،٢،٩) درجة الصوت الأساسية (أ) ودرجات صوت أنماط النغمات الاهتزازية الإضافية الخمسة الدنيا (ب-و) لجلدة طبل. كل نمط اهتزازي هو موجة موقوفة، لكن بعقد اهتزازية هي منحنيات أو خطوط بدلا من نقاط. النمط الأساسي (أ) له عقدة واحدة فقط في حافته الخارجية، بينما أنماط النغمات الإضافية لها عُقد إضافية داخل السطح. في كل نمط اهتزازي، تظل هذه العُقد بلا حركة بينما يهتز باقي السطح للأعلى وللأسفل، فتتغير قممه وقيعانه بالتبادل. درجات صوت اهتزازات النغمات الإضافية موضحة بالنسبة لدرجة صوت الاهتزاز الأساسي. (للمحة تاريخية حول فهم أنماط السطح، انظر ◊٤).

بما أن ضرب جلدة الطبل يتسبب في اهتزازه بأنماط مختلفة في الوقت ذاته، فإن الطبل يُصدر العديد من درجات الصوت بشكل آني. تعتمد سعة كل نمط، وبالتالي حجمه، ليس فقط على شدة ضربك لجلدة الطبل، بل أيضا على مكان ضربك إياها. إذا ضربتها في مركزها، فإنها تهتز أساساً في أنماط دائرية مثل (أ) و(د). إذا ضربتها بالقرب من حافتها، فإنها تهتز أيضا في أنماط غير دائرية مثل (ب)، و(ج)، و(هـ)، و(و).

صوت الدفّيّة يكون أكثر موسيقية عندما تُضرب بعيدا عن المركز بطريقة بحيث تكون سعة نمط اهتزازها الأساسي تقريبا صفراً وتسيطر نغماتها الإضافية، خصوصا (ب)، على الصوت. ذلك لأن نمط الاهتزاز الأساسي يُصدر صوتاً بطريقة جيدة جدا بحيث تتبدد طاقته الاهتزازية قبل أن يمكنه إنتاج نغمة قابلة للإدراك. ما لم يكن كل ما تريده هو صوت «ضربة مكتومة» عالية، فيجب أن تضرب الدفية بعيدا عن المركز بحيث تستقبل نغمات اهتزازاتها الإضافية الطويلة الأجل معظم الطاقة وتُصدر معظم الصوت. درجة الصوت المهيمنة في دفية معزوفة بشكل جيد هي نغمة اهتزازها الإضافية الأولى ويتم ضبط الدفية بأخذ درجة الصوت تلك في الاعتبار.

في الحقيقة، درجات الصوت الموضحة في شكل (٩،٢،٩) تُهمل تأثير قصور الهواء على اهتزازات جلدة الطبل. بما أن الهواء يضيف قصوراً لجلدة الطبل، فإنه يخفض درجات صوت كل أنماط الاهتزاز، بعضها أكثر من البقية. بسبب تأثير الهواء على درجة الصوت، يجب ضبط الطبل ليتلاءم مع التغيرات في درجة الحرارة والطقس.

◊٤ في عام ١٨٠٩م، أعلنت الأكاديمية الفرنسية للعلوم عن مسابقة لتفسير الأنماط المعقدة الملاحظة على أسطح صفائـح مهتزة. المسـتجيب الوحيد كان عالمة الرياضيات الفرنسية صوفي جيرمـان (١٧٧٦-١٨٣١م). كامـرأة، مُنعت جيرمان من التعليم الرسـمي في الرياضيات، وكافحت لتعلُّم المادة من كتـب ومن خـلال المراسـلات مع قـادة علماء الرياضيـات، والتي أجرتها تحت اسم مستعار أنطوين - أوغست لي بلانك. تطلب الأمر منها ثلاث محاولات، لكن في عام ١٨١٦م مُنحت الجائزة. لكن بسـبب كونها امـرأة، لم تحضر حفل المسـابقة. إن تحليلها لاهتزاز الأسـطح، على الرغم من نقصه، كان مجهوداً مبدعاً جُعل اسـتثنائيا بظروفها. عـلى الرغم من أن معلمهـا، كارل فريدريك جاوس، اسـتطاع أن يُقنـع جامعة جوتنجن بمنحها درجة فخريـة، إلا أنها ماتت بسرطان الثدي قبل أن تستلمها.



شكل ١٠,٢,٩: تتكون الموجة الصوتية المتحركة في الهواء من نمط لوح مموج من مناطق كثافة مرتفعة (أزرق) وكثافة منخفضة (أبيض). المسافة الفاصلة بين القمم المتجاورة هي الطول الموجي وسرعة واتجاه حركة القمة هي السرعة المتجهة للموجة.

تحقق من فهمك #٧: طفل الفضاء الأول (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

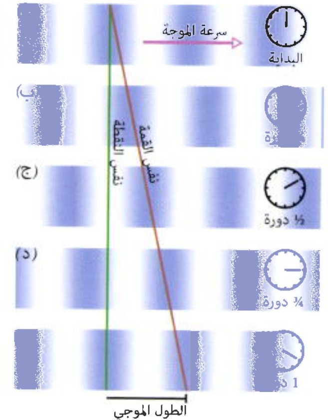
يُعتبر الترامبولين خطيراً عند وجود العديد من الأطفال عليه لأن الطفل الهابط على أحد جوانب سطحه يمكنه أن يُطلق للسماء طفلا آخر يقف على الجانب الآخر للسطح. كيف يمكن لارتطام باتجاه الأسفل في أحد جوانب الترامبولين أن يُنتج ارتفاعاً مفاجئاً في الجانب الآخر؟

الصوت في الهواء

كل هذه الاهتزازات ستكون ذات فائدة قليلة إذا لم نستطع سماعها، لذا آن الوقت للنظر في كيفية إنتاج الآلات للصوت. سوف نبدأ بالنظر في الصوت ذاته.

لاحظنا في بداية هذا القسم أن الصوت في الهواء يتكون من موجات كثافة - أي أنماط من الانضغاطات والتخلخلات التي تخرج بسرعة من مصدرها. بالرغم من أن تلك الملاحظات كانت غامضة في ذلك الوقت، إلا أننا يمكننا الآن فهم تلك الموجات كاهتزازات في جسم ممتد ذي اتزان مستقر. هذا الجسم المهتز هو الهواء.

بتجاهل الجاذبية، يكون الهواء في حالة اتزان مستقر عندما تكون كثافته منتظمة. إذا أحدثنا اضطراباً فيه عن اتزانه، فإن عدم توازن الضغط الناتج سيوفّر قوى إرجاع شبيهة بالزنبرك.هذه القوى، سوية مع قصور الهواء، تؤدي إلى اهتزازات تناغمية - اهتزازات متذبذبات توافقية. في الهواء المفتوح، أكثر الاهتزازات الأساسية هي الموجات التي تتحرك بثبات في اتجاه محدد وبالتالي تسمى موجات متحركة. مثل الموجات الموقوفة داخل أنبوب الأورغن، تكون هذه الموجات المتحركة في الهواء المفتوح موجات طولية - يهتز الهواء في نفس اتجاه حركة الموجة الصوتية.



شكل ١١,٢,٩: موجة صوتية عند خمسة أزمان متباعدة بالتساوي (أ - هـ) توضح دورة تذبذب كاملة. أثناء تلك الدورة، ينتقل الضغط عند نقطة محددة في الفضاء من مرتفع إلى منخفض إلى مرتفع (الخط الأخضر) وتتحرك قمة معينة بمقدار طول موجي واحد إلى اليمين (الخط الأحمر).

حينما تسير موجة صوتية أساسية متحركة خلال الهواء المفتوح، فإنها تتكون من نمط متبادل من مناطق كثافة مرتفعة سنسميها قمماً ومناطق كثافة منخفضة سنسميها قيعان (شكل ١٠,٢,٩). مع أن هذه الأسماء ستبدو ملائمة أكثر عندما نفحص موجات سطح الماء في القسم التالي، إلا أنه من المعتاد الإشارة للارتفاعات والانخفاضات المتبادلة لأي موجة كقمم وقيعان، على التوالي. سواء كانت الموجات موقوفة أو متحركة، فإن أقصر مسافة بين قمتين متجاورتين تُعرف بالطول الموجي.

في حين تنقلب قمم وقيعان الموجة الموقوفة ذهابا وإيابا في مكانها فحسب، فتصبح القمم قيعان والقيعان تصبح قمماً، إلا أن قمم وقيعان الموجة المتحركة تتحرك بثبات في اتجاه معين بسرعة معينة. تلك السرعة واتجاه الحركة سوية يُشكلان سرعة الموجة المتحركة.

يوضح الشكل (١١,٢,٩) خمس لقطات لموجة صوتية بسيطة تتجه نحو اليمين. إذا راقبنا كثافة الهواء عند نفس النقطة في الفراغ (الخط الأخضر)، فإنها تبدأ بقمة (ا)، ثم تتناقص (ب) إلى قاع (ج) ثم ترتفع (د) عائدة للقمة (هـ) أثناء دورة اهتزازية واحدة كاملة. ولكن، إذا تتبعنا نفس القمة (الخط الأحمر) بمرور الوقت، فإنها تتحرك طولاً موجياً واحداً إلى اليمين أثناء دورة اهتزازية واحدة كاملة (أ - هـ). بما أن القمة تتحرك طولاً موجياً واحداً لكل دورة اهتزازية، والتردد هو عدد الدورات الاهتزازية في الثانية، فإن السرعة التي تتحرك بها القمة هي حاصل ضرب الطول الموجي في التردد. هذه العلاقة يمكن كتابتها كمعادلة

لفظية: سرعة الموجة = الطول الموجي × التردد (١,٢,٩)

ورمزيا:

$$\upsilon = \lambda \nu$$

وفي لغة الحياة اليومية: الموجات العريضة التي تهتز بسرعة تتحرك بسرعة.

إن من المدهش بما فيه الكفاية أن جميع الموجات الصوتية تتحرك بنفس السرعة خلال الهواء، بغض النظر عن الطول الموجي أو التردد. ذلك لأن الطول الموجي للصوت يتناسب عكسيا مع تردده دائماً. لقد رأينا نفس هذه العلاقة العكسية للموجات الموقوفة في أنابيب الأورغن: إذا ضاعفت طول الأنبوب، وبالتالي ضاعفت الطول الموجي لنمطه الاهتزازي الأساسي، فأنت تُنصّف تردد ذلك الاهتزاز. حتى وإن لم يكن الهواء المهتز محصورا بالأنبوب، فإن له طولاً موجياً يتناسب عكسيا مع تردد ذلك الاهتزاز.
بسبب هذه العلاقة العكسية الرائعة بين الطول الموجي لموجة صوتية متحركة وترددها، فإن معادلة (١،٢،٩) تعطي نفس سرعة الموجة لأي موجة صوتية. تُعرف تلك السرعة بسرعة الصوت في الهواء، وهي حوالي 331m/s (1086ft/s) في الشروط القياسية عند مستوى سطح الماء (0°C وضغط 101,325Pa). مع أن ذلك سريع، إلا أنه ما زال هناك تأخر ملحوظ بين ضربات العازف على الصنج النحاسي وسماعك لها عبر قاعة الحفل الموسيقي. من حسن الحظ، وبما أن سرعة الصوت لا تعتمد على التردد، فعند عزف جميع الأوركسترا بشكل منسجم فإنك تسمع جميع درجات صوتها آنيا.

يفترض هذا النقاش عن الصوت أن الآلات والمستمع يحافظان على بُعد ثابت، كما هو الحال في قاعة أوركسترا. لكن عندما تقترب أو تبتعد فرقة موسيقية سائرة بالنسبة لمستمع، يحدث أمر غريب: إن المستمع يسمع الموسيقى الصادرة متغيرة للأعلى أو للأسفل في درجة الصوت. يحدث هذا التغيّر في التردد، والذي يُعرف بتأثير دوبلر، لأن المستمع يواجه قمم الموجات الصوتية بمعدل مختلف عن معدل تكوّن هذه القمم. إذا تقاربت الآلات والمستمع من بعضهما البعض، فإن المستمع يواجه القمم بمعدل متزايد وتزداد درجة الصوت. إذا تباعدا عن بعضهما البعض، فإن المستمع يواجه القمم بمعدل متناقص وتتناقص درجة الصوت. من حسن الحظ، يكون تأثير دوبلر غير ملحوظ عند السرعات الصغيرة مقارنة بسرعة الصوت، لذا يمكنك الاستماع لاستعراض موسيقي دون أن يبدو منخفضا أو حادا.

تحقق من فهمك #٨: يبدو سمعيا أسرع (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

الهيليوم في لعبة بالون له نفس صلابة الهواء العادي، لكن كثافته وقصوره أصغر. كيف يؤثر هذا الاختلاف على سرعة الصوت في الهيليوم؟

دقق في أرقامك #١: صوت تحت الماء (للإجابة، انظر صفحة ٢٩١)

بالرغم من أن الماء أكثر كثافة من الهواء العادي بـ 800 مرة تقريباً، إلا أن الماء أصلب بحوالي 15,000 مرة أيضاً وبالتالي تكون لاهتزازته الصوتية ترددات متزايدة بالنسبة للتي في الهواء. عندما يكون لموجتين صوتيتين طولان موجيان متساويان، فإن الموجة في الماء يكون لها تردد حوالي 4.3 مرات أكبر من الموجة في الهواء. ما هي سرعة الصوت في الماء؟

تحويل الاهتزازات إلى صوت

أي شيء يُحدث اضطراباً في الهواء والذي هو في العادة ذو كثافة منتظمة يمكن أن يُنتج موجات صوتية متحركة. تصدر الآلات صوتا بضغط وتخلخل الهواء القريب منها بالتزامن مع اهتزازاتها الخاصة. تختلف كيفية إنجازها هذه المهمة من آلة لأخرى، فسنحتاج أن ننظر إليها بشكل انفرادي. كما سنرى، بعض الآلات يمكنها أن تصدر صوتا بشكل أسهل من آلات أخرى.

ينتج الطبل صوتا عندما تضغط وتخلخل جلدة الطبل المهتزة الهواء القريب بشكل تبادلي. بينما ترتفع أجزاء من جلدة الطبل وتنخفض، فإنها تُحدث اضطراباً في كثافة الهواء المنتظمة وبالتالي تنتج موجات صوتية. لكن كلما استطاع الهواء، فإنه ببساطة يتدفق بصمت بعيدا عن جلدة الطبل، مؤديا إلى تقلبات أصغر في الكثافة وصوت ذي شدة منخفضة أكثر. على سبيل المثال، عندما تواجه جلدة الطبل أحد الخمس اهتزازات الإضافية الموضحة في شكل (٩،٢،٩)، فإن الهواء يتدفق بعيدا عن كل قمة مرتفعة في السطح المتموج وباتجاه كل قاع منخفض. ما زالت الاهتزازات الإضافية قادرة على إنتاج صوت، لكنه أقل شدة، وتتحوّل الطاقة الاهتزازية في جلدة الطبل لطاقة صوتية ببطء نسبيا.

إن نجاح الهواء الجزئي في تجنب اهتزازات جلدة الطبل الإضافية يسمح لهذه الاهتزازات الإضافية بإكمال العديد من الدورات الاهتزازية قبل أن تستنفد الطاقة الاهتزازية. وبالتالي تستمر اهتزازاتها وقتاً طويلاً ويكون لها درجات صوت مميزة. على النقيض من ذلك، يواجه الهواء صعوبة في تجنب النمط الاهتزازي الأساسي لجلدة الطبل، والذي يضغط ويخلخل الهواء بالتبادل بكفاءة بحيث ينقل جميع طاقته الاهتزازية إلى الهواء في بضع دورات فقط. لذلك فإن نمط الاهتزاز الأساسي يُنتج صوتا «مكتوما» عالياً بدون درجة صوت تقريبا. إذا استطاع الهواء أن يتجنب سطحاً مهتزاً، فإنه بالتأكيد يستطيع أن يتجنب وتراً مهتزاً. يأتي القليل من صوت الكمان من أوتاره المهتزة مباشرة؛ فالهواء يلتف حولها ببساطة. بدلا من ذلك، يكوّن الكمان الصوت بواسطة سطحه العلوي أو جوفه (شكل ١٢،٢،٩). تنقل الأوتار حركاتها الاهتزازية للجوف فيدفع الجوف على الهواء لإنشاء الصوت.



شكل ١٢،٢،٩: تحوّل فرسة الكمان الطاقة من أوتاره المهتزة إلى جوفه. يتحرك الجوف إلى الداخل وإلى الخارج، فيصدر صوتا. بعض هذا الصوت يُغادر الكمان من خلال فتحات في جسمه لها شكل حرف f.

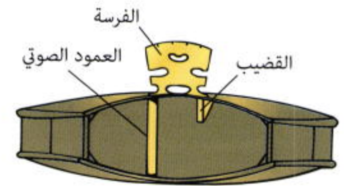
معظم هذه الطاقة الاهتزازية تتدفق إلى الجوف خلال فرسة الكمان، والتي تُبقي الأوتار بعيدا عن جسم الكمان (شكل ١٣،٢،٩). تحت جانب الوترG3 من الفرسة يوجد القضيب، وهو قطعة طويلة من الخشب تجعل الجوف أكثر صلابة. وتحت جانب الوتر E5 من الفرسة يوجد العمود الصوتي، عود يمتد من جوف الكمان إلى ظهره.

بينما يهتز وتر بواسطة القوس عبر جوف الكمان، فإنه يبذل عزماً دورانياً على الفرسة حول العمود الصوتي. تلتف الفرسة ذهابا وإيابا، متسببة في تحرك الحائل اللحائي والجوف إلى الداخل وإلى الخارج. تنتج حركة الجوف معظم صوت الكمان. يأتي بعض هذا الصوت مباشرة من السطح الخارجي للجوف، ويأتي الباقي من سطحه الداخلي ويجب أن يخرج من خلال فتحاته التي على شكل حرف f.

لا يحتاج أنبوب الأورغن أن ينتج صوتا لأن ذلك الصوت موجود سابقا. في الواقع، عمود الهواء المهتز في الأنبوب هو موجة صوتية موقوفة تتسرب لخارج الأنبوب تدريجيا كموجة متحركة. يهرب صوت محصور من حاويته.

هذا التحوّل من موجة موقوفة إلى موجة متحركة ليس شيئا رائعا بشكل كبير لأن نوعي الموجات مرتبطة ببعضها إلى حد بعيد. يمكن تَخيُّل الموجة الموقوفة للأنبوب كموجة متحركة منعكسة، أي موجة متحركة ترتد ذهابا وإيابا بين نهايتي الأنبوب. بسبب الانعكاسات، تتراكب الموجة المتحركة مع نفسها التي تتحرك في الاتجاه المعاكس، ومجموع الموجتين المتحركتين المتساويتين لكن المتعاكستين في الاتجاه هو موجة موقوفة!

كون الصوت ينعكس من الطرف المفتوح لأنبوب الأورغن هو مفاجئ بعض الشيء. إذا كان ذلك الطرف مغلقاً، فمن المحتمل أنك ستتوقع انعكاساً، إذ يرتد الصوت كصدى من على الجبال والأسطح الصلبة الأخرى. ولكن الصوت ينعكس جزئيا من على مدى مدهش من الانتقالات الأخرى، بما في ذلك الانتقال من داخل الأنبوب إلى خارجه. إذا لم تصدّق ذلك، صفّق بيديك داخل أنبوب طويل واستمع للصدى المتضائل.

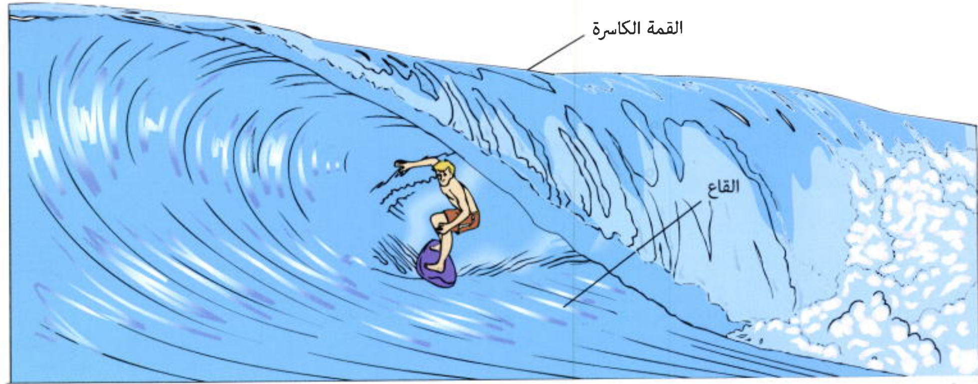


شكل ١٣،٢،٩: تكون الفرسة مُدعمة بقضيب من جانب وبعمود صوتي من الجانب الآخر. حينما تتذبذب الأوتار ذهابا وإيابا، تواجه الفرسة عزماً يتسبب في تحرك جوف الكمان للداخل وللخارج مصدراً صوتا.

إن الانعكاسات عند الطرف المفتوح لأنبوب الأورغن ليست مثالية، لذا تتسرب الموجة الصوتية المحصورة تدريجيا للخارج وتُصبح الصوت الذي تسمعه. إن عملية سماح الموجة الصوتية الموقوفة بالخروج ببطء كموجة متحركة هي شيء معتاد في آلات النفخ الخشبية والنحاسية. يعتمد الانعكاس عند الطرف المفتوح للأنبوب على شكل ذلك الطرف. الاتساع التدريجي للخارج والذي يتخذ شكل بوق والمعتاد في آلات النفخ النحاسية يقلل من الانعكاس ويُسهّل الانتقال من موجة موقوفة إلى موجة متحركة. ولهذا تبرز الأبواق الصوت بشكل جيد جدا.

تحقق من فهمك # ٩: القيثارة الهوائية (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

لماذا يكون للقيثارة الصوتية صندوق صوتي؟



٩-٣ البحر

لا يسكن البحر أبدا. إذا كنت قد زرت شاطئ البحر، فمن المحتمل أنك لاحظت حركتين من أهم حركات البحر: المد والجزر والموجات السطحية. في هذا القسم، سوف نفحص دورة المد والجزر وننظر في كيفية حركة الموجات السطحية عبر الماء. هذه الموجات السطحية يمكنها أن تساعدنا في فهم ظواهر موجية أخرى، بما في ذلك الموجات الكهرومغناطيسية والمسؤولة عن الضوء، وموجات الكثافة والتي يستند عليها الصوت.

أسئلة للتفكير:

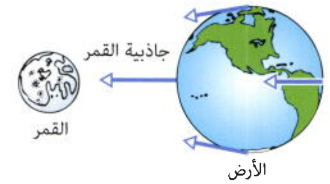
لماذا يتغير ارتفاع المد والجزر من مكان لآخر؟ لماذا لا يوجد مد وجزر ذو أهمية في بحيرة أو مسبح؟ لماذا يحدث المد كل 12 ساعة تقريبا؟ ما الذي يتحرك في موجة مائية؟ هل تسير كل الموجات بنفس السرعة؟ ما هو عمق الموجة؟ لماذا تنكسر الموجات بالقرب من الشاطئ؟ لماذا تبدو الموجات دائما متجهة مباشرة تقريباً نحو الشاطئ؟ لماذا يكون هناك في الغالب إيقاع للأمواج المتكسرة؟

تجارب يمكن القيام بها:

في حين تستطيع أن تصنع موجات مائية في حوض، إلا أنها تتحرك بسرعة جدا فيصعب رؤيتها بوضوح. سيكون أفضل لك مشاهدة الأمواج عند الشاطئ. في يوم هادئ، يكون البحر في شكله الاتزاني المستوي. لكن عندما تزداد الرياح، انتبه. كيف تؤثر الرياح على سطح البحر؟ إذا احتوت الموجات المائية على طاقة، فمن أين تأتي تلك الطاقة وما الأشكال التي تتخذها داخل الماء؟ راقب تحرك جسم طافٍ حينما تمر موجة به. هل يتحرك الجسم مع الموجة؟ هل الماء نفسه يتحرك مع الموجة؟ هل يمكنك التفكير في حالات أخرى يتحرك فيها الاضطراب بثبات إلى الأمام لكن تظل المادة الحاملة للاضطراب متخلفة عنه؟
والآن راقب تكسّر الموجات بالقرب من الشاطئ. إذا نظرت في شواطئ مختلفة، ستجد أن الموجات تتكسر بطريقتين مختلفتين. في بعض الحالات ستتحطم الموجة ببساطة إلى كومة من الزبد، بينما في الأخرى سوف يغوص أعلى الموجة إلى الأمام من فوق الماء المتقدم عنه. هل يمكنك رؤية أي شيء عن الشواطئ أو الماء والذي يمكن أن يُعلل هذا الاختلاف؟

المد والجزر

إذا راقبت البحر لبضعة أيام، سوف تلاحظ المد والجزر. في دورة بقدم المحيطات نفسها، يرتفع مستوى الماء لمدة ست ساعات وربع تقريبا ليصل للمد العالي، ثم يهبط لمدة ست ساعات وربع ليصل للجزر المنخفض، ثم يبدأ بالارتفاع مرة أخرى. كان هذا لغزاً رائعاً في السابق، لكننا الآن نعرف أن المد والجزر يحدث نتيجة دوران الأرض، وجاذبية القمر، ولدرجة أقل جاذبية الشمس.



شكل ٩،٣،١: تتفاوت جاذبية القمر على سطح الأرض. كلما اقتربت نقطة من القمر، ازدادت قوة الجاذبية التي تواجهها. هذا التفاوت في جاذبية القمر ينتج المد والجزر.

على الأرض، تكون جاذبية القمر ضعيفة جدا إلى درجة أننا لا نلاحظها في العادة. القمر بعيد جدا، وكما تعلمنا في قسم ٤-٢، تضعف الجاذبية مع زيادة المسافة. لكن هذا الاعتماد على المسافة يعني أيضا أن جاذبية القمر أقوى في أحد جانبي الأرض منها في الجانب الآخر؛ فأنت تواجه جذباً أقوى عندما تكون في جانب الأرض الأقرب من القمر مقارنة بما تواجهه عندما تكون في الجانب المعاكس له (شكل ٩،٣،١). في حين لا تستطيع الشعور بهذه التفاوتات في جاذبية القمر بنفسك، إلا أن محيطات الأرض تستجيب لها. تتشوه المحيطات بفعل جاذبية القمر (شكل ٩،٣،٢) وهذا التشوه يُنتج المد والجزر.

إن الاختلافات بين جاذبية القمر عند مواقع محددة على الأرض ومتوسط شدتها بالنسبة لجميع الأرض تُنشئ قوى المد والجزر - أي قوى جاذبية متبقية تعمل على إزاحة تلك المواقع بالنسبة للأرض بأكملها. ينجذب جانب الأرض القريب نـحو القمر بقوة أقوى من المتوسط لذا فهو يواجه قوى مد وجزر نـحو القمر. ينجذب جانب الأرض البعيد نـحو القمر بقوة أقل من المتوسط لذا فهو يواجه قوى مد وجزر بعيدا عن القمر. إذا كانت الأرض أقل صلابة، فإن قوى المد والجزر هذه ستتسبب في تمدد الأرض على شكل شبيه بالبيضة. سيبرز جانب الأرض القريب إلى الخارج نـحو القمر، بينما جانب الأرض البعيد سيبرز إلى الخارج بعيدا عن القمر. لكن مع أن الأرض نفسها صلبة جدا فلا تتشوه كثيرا، إلا أن المحيطات ليست كذلك فتبرز إلى الخارج استجابة لقوى المد والجزر. يظهر بروزان مديان جزريان: أحدها أقرب ما يمكن من القمر والآخر أبعد ما يمكن عن القمر (شكل ٩،٣،٢). سيواجه الشاطئ الموجود في أحد هذين البروزين المديين الجزريين مداً عالياً، بينما يواجه الشاطئ الموجود في منتصف حلقة المحيط بين البروزين جزراً منخفضاً.



شكل ٩،٣،٣: يتغيّر المد والجزر عبر الشهر القمري. فهما أقوى ما يمكن عندما تكون الشمس والقمر على استقامة واحدة (المد والجزر الربيعي) وأضعف ما يمكن عندما يكون الشمس والقمر عند زاوية ٩٠° من بعضهما البعض (المد والجزر المحاقي).

حينما تدور الأرض حول نفسها، تتحرك مواقع البروزين المديين الجزريين باتجاه الغرب حول خط الاستواء. بما أن شاطئاً معيّناً يواجه مداً عالياً كلما كان أقرب أو أبعد ما يمكن عن القمر، فإن الدورة الكاملة من مد عالٍ إلى جزر منخفض إلى مد عالٍ تحدث حوالي مرة واحدة كل 12 ساعة و25 دقيقة. الـ 25 دقيقة الإضافية تعكس حقيقة أن القمر ليس ثابتا؛ إذ يدور القمر حول الأرض كل 27.3 يوماً وبالتالي يمر فوقنا مرة كل 24 ساعة و50 دقيقة، وليس مرة كل 24 ساعة.

لكن القمر ليس هو المصدر الوحيد لقوى المد والجزر على محيطات الأرض. بالرغم من أن الشمس أبعد من القمر بكثير، إلا أنها ذات كتلة هائلة بحيث قوى المد والجزر التي تبذلها هي نصف تلك التي يبذلها القمر. تأثير الشمس الأساسي هو زيادة أو إنقاص قوة المد والجزر التي يُحدثها القمر (شكل ٩،٣،٣). عندما يكون القمر والشمس على استقامة واحدة، فإن قوى المد والجزر منهما تتجمع لتنتج بروزات مد وجزر أكبر حجما. عندما يكون القمر والشمس على شكل عمودي بالنسبة لبعضهما البعض، فإن قوى المد والجزر لهما تُلغى جزئيا وتنتج بروزات مد وجزر صغيرة جدا.

يكون المد والجزر قويين جداً مرتين في كل شهر قمري، أي الزمن الذي يستغرقه القمر للدوران حول الأرض. يحدث هذا المد والجزر الربيعي كلما كان القمر والشمس على استقامة واحدة (عند البدر والهلال). مرتين في كل شهر قمري يكون المد والجزر ضعيفين جدا. يحدث هذا المد والجزر المحاقي كلما كان القمر والشمس متعامدين بالنسبة لبعضهما البعض (نصف البدر).





شكل ٩،٣،٢: تُنتج التفاوتات في جاذبية القمر قوى مد وجزر على سطح الأرض وتتسبب في بروز محيطات الأرض للخارج في موقعين. يتحرك هذان البروزان، والواقعان عند أقرب ما يمكن وأبعد ما يمكن من القمر، عبر سطح الأرض بينما تدور حول نفسها.

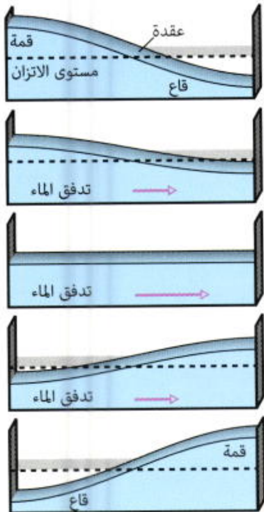
بسبب هذا التفاعل بين تأثيرات المد والجزر القمرية والشمسية، فإن دورة المد والجزر تتغير بشكل طفيف من يوم لآخر. في حين يكون متوسط الدورة ١٢ ساعة و٢٥ دقيقة، إلا أنها تتقلب خلال الشهر القمري. علاوة على ذلك، تتأثر اللحظة الدقيقة لحصول المد العالي والجزر المنخفض عند موقع محدد بقصور الماء، ودوران الأرض حول نفسها، والبيئة التي يجب أن يتدفق الماء خلالها لتكوين بروزات المد والجزر. ولهذا كثيراً ما تنشر المناطق الشاطئية جداول توضح المد والجزر المحلي.

تحقق من فهمك #١: العُطل الساحلية للمد والجزر (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

يقترب المحيط الأطلسي والهادي من بعضهما البعض كثيراً في أمريكا الوسطى. إذا كان الجانب الأطلسي من هذا البرزخ يواجه مداً عالياً، فما هو المد والجزر الذي يواجهه الجانب الهادي؟

رنين المد والجزر

إن أحجام المد والجزر تعتمد على موقعك، لكن المد العالي هو في العادة متراً أو مترين فوق الجزر المنخفض. بسبب وقوع بروزات المد والجزر بالقرب من خط الاستواء، فإن المد والجزر البعيدة باتجاه الشمال أو الجنوب تكون أقل من ذلك؛ والمد والجزر في البحيرات أو الأبحر المعزولة تكون أقل بكثير لأن الماء لا يمكنه أن يتدفق ليكوّن البروزات. ولكن هناك بعض المواقع الخاصة التي لها مد وجزر عظيمان. على سبيل المثال، يمكن للمد والجزر في خليج فندي، وهو مصب نهر بين نيو برنزويك ونوفا سكوشيا، أن يغيرا مستوى الماء بمقدار 15 متراً. كيف يمكن أن يصل المد والجزر لهذا المقدار الكبير؟



شكل ٤,٣,٩: ماء يتحرك في حوض عند نمطه الأساسي. يتذبذب سطحه للأعلى وللأسفل، فتصبح قمته قاعا والعكس بالعكس، مرة بعد أخرى.

ينتج المد والجزر العملاقان من الرنين الطبيعي في القنوات ومصبات الأنهار. مثلما يمكن جعل الهواء في أنبوب أورغن مفتوح يهتز بقوة من خلال سلسلة من الدفعات المؤقتة بعناية من مضخة، فإن الماء في قناة أو مصب نهري يمكن جعله يتذبذب بقوة من خلال سلسلة من الدفعات المؤقتة بعناية من المد والجزر. الماء في تلك القنوات هو جسم ممتد آخر باتزان مستقر، لذا فإنه سيتذبذب حول اتزانه بعد إحداث اضطراب فيه. يحدث المد والجزر العملاقان من خلال انتقال الطاقة الرنيني عندما تُعزز دورة المد والجزر سعة موجة موقوفة مناسبة في قناة تدريجياً.

ولكن، مع أن الموجات الموقوفة في أنبوب أورغن تتضمن عمود الهواء ككل، فإن الموجات الموقوفة في قناة تتضمن في المقام الأول سطح الماء المفتوح. يكون ذلك الماء عند اتزان عندما يكون سطحه مستوياً وأفقياً، ويواجه قوى إرجاع شبيهة بقوى الزنبرك كلما حدث اضطراب على سطحه. بالنسبة للموجات الواسعة التي نتطرق لها في هذا القسم، فإن قوى الإرجاع هذه هي بسبب الجاذبية وتُعرف بموجات الجاذبية. لكن بالنسبة للموجات الصغيرة في كأس شراب، فإن سطح الماء المرن يساهم بشكل كبير في قوى الإرجاع. الموجات التي تتضمن هذا التوتر السطحي تُعرف بالموجات الشعيرية.

يمكنك أن تشاهد موجات جاذبية موقوفة على سطح الماء في حوض كبير. إذا بدأت بدفع الماء للأمام وللخلف بيدك بشكل متناغم، فستنتج موجات على سطحه. وإذا وقّتّ دفعاتك بعناية بحيث تتزامن مع الإيقاع الطبيعي لموجة موقوفة محددة، فسوف تعزّز سعة تلك الموجة من خلال انتقال الطاقة الرنيني. اكتشف عدد لا يُحصى من الأطفال هذه الظاهرة كطريقة لتسلية أنفسهم أثناء وقت الاستحمام - وإن كانت خيبة أمل للآباء ومسرة للأشخاص الذين يصلحون الأرضيات والأسقف التالفة بسبب الماء.

إيفيرت جونسون\صورة إيستوك





شكل ٥,٣,٩: يمكن للمد العملاق في خليج فندي أن يتسبب في تغير مستوى مائه بمقدار يصل إلى ١٥ متر بين المد العالي والجزر المنخفض.

مثل الموجات الموقوفة في أوتار الكمان وجلود الطبل، فالموجات السطحية الموقوفة على الماء هي موجات مستعرضة – فاهتزازات سطح الماء الرأسية هي عمودية على الموجات الأفقية ذاتها. في حوض، يكون لنمط الاهتزاز الأساسي (شكل ٤,٣,٩) بطن عند منتصف الحوض وعُقد عند كلا الطرفين. عند إحدى العقد، يتقوّس الماء للأعلى مكونا قمة – إزاحة قصوى إلى الأعلى عن الاتزان. عند العقد الأخرى، يتقوّس الماء للأسفل ليكوّن قاعاً – إزاحة قصوى إلى الأسفل عن الاتزان. عبر الوقت، تهبط القمة لتصبح قاعاً بينما يرتفع القاع ليصبح قمة. هذه العملية تنعكس ثم تتكرر مرة بعد مرة إلى أن يحوّل الماء المتحرك كل طاقته الاهتزازية إلى طاقة حرارية أو ينقلها لمكان آخر.

إن المد والجزر العظيمين عند نهاية مصب نهري هما ببساطة عقدة موجة موقوفة تتذبذب للأعلى وللأسفل بين قمة وقاع. في حين الموجات الموقوفة في حوض غسيل معتاد لها أزمان دورية تُقاس بالثواني أو أقل من ذلك، فإن كتل الماء الكبيرة يمكنها أن تحافظ على موجات موقوفة تُعرف بالمد البُحيريّ ولها أزمان دورية تقاس بالدقائق أو حتى الساعات. إن الماء في خليج فندي له نمط مد بُحيري أساسي بزمن دوري مقداره 13.3 ساعة تقريبا. بما أن هذا الزمن الدوري يطابق تقريبا دورة المد والجزر والتي هي 12.5 ساعة، فإن هناك انتقال طاقة رنيني من القمر إلى الماء المتذبذب في المصب. يدفع المد والجزر الماء ذهابا وإيابا في هذا المصب إلى أن يتحرك الماء - بعد عدة دورات - بقوة كبيرة بحيث يتغير ارتفاعه بشكل كبير مع الزمن (شكل ٥,٣,٩).

تحقق من فهمك # ٢: مكاسب محتملة (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

يقترح الناس من حين لآخر استخدام مد عملاق لتوليد طاقة كهربائية. لكن هناك مشكلة في هذه الفكرة. إذا استخلصت كل طاقة الجذب الكامنة من الماء في المد العالي في خليج فندي، كم من الوقت سيستغرق مد عالٍ عملاق ليظهر مرة أخرى؟

الموجات المتحركة على سطح الماء

بينما تجلس عند الشاطئ في يوم صحو، مستمتعا بنسيم دافئ ثابت، لا يمكنك إلا أن تلاحظ أن البحر أمامك مُغطى بقمم أمواج. تتحرك هذه القمم بثبات باتجاه الأرض وفي نهاية الأمر تصطدم بالشاطئ. بالرغم من أنه من المعتاد أن نظن أن كل موجة منكسرة هي موجة منفصلة، إلا أننا سنجد أنه من المفيد أن ننظر لجميع النمط المتحرك للقمم المنتظمة التباعد كموجة واحدة – موجة سطحية متحركة على الماء.

إن الموجات السطحية المتحركة هي الأنماط الأساسية للتذبذب على المحيط المفتوح، وأبسط الموجات على ذلك السطح اللامحدود. على الرغم من تقدمها الثابت عبر الماء، إلا أن هذه الموجات المتحركة في الحقيقة تتضمن تذبذباً. يمكنك رؤية هذا التذبذب بمراقبة نقطة ثابتة على سطح الماء. تلك النقطة تتذبذب للأعلى وللأسفل بينما تمر قمم وقيعان الموجة المتحركة بها. الزمن الدوري لهذا التذبذب هو الوقت المطلوب لدورة واحدة كاملة من الارتفاع والانخفاض، والتردد هو

عدد القمم المارة خلال تلك النقطة الثابتة في كل ثانية.

يمكن لسطح المحيط أن يستضيف تشكيلة مدهشة من الموجات المتحركة، كلٌّ منها تتحرك في اتجاهها الخاص بزمنها الدوري وترددها الخاص. علاوة على ذلك، يمكن لهذه الموجات الأساسية أن تتواجد آنيا، فتتجمع سوية على سطح المحيط لتكوّن أنماطاً أكثر تعقيدا. مثل الألوان الأساسية، والتي عند مزجها بكميات مناسبة يمكن أن تنتج أي لون ممكن، فإن الموجات المتحركة يمكنها أن تتراكب بمقادير مناسبة لإنتاج أي نمط سطحي أو موجة ممكنة. عندما يكون المحيط هائجاً ويُظهر سطحه تموجات صغيرة على طبقة من الموجات الواسعة، فأنت ترى هذا التراكب من الموجات المتحركة «الأولية» في كامل تألقها.

على النقيض، تكون الأنماط الأساسية للتذبذب في قناة أو بحيرة موجات سطحية موقوفة - أبسط الموجات على ذلك السطح المحدود. في الموجة الموقوفة، يتذبذب سطح الماء للأعلى وللأسفل رأسيا، بتبادل قممه وقيعانه بشكل دوري: تصبح القمم قيعان وتصبح القيعان قمماً. لا يتحرك نمط الموجة الموقوفة للقمم والقيعان لأي مكان؛ بل ببساطة ينقلب للأعلى وللأسفل في مكانه بتردد معيّن.

يمكن لهذه الموجات الموقوفة أن تتراكب على سطحها المحدود لتنتج أي نمط سطحي أو موجة ممكنة، لذلك هي أيضا مثل الألوان الأساسية. إجمالا، تُشكّل الموجات المتحركة لوحة الموجات الأساسية للمحيط اللامحدود وتُشكّل الموجات الموقوفة لوح الموجات الأساسية للقناة أو البحيرة المحدودة.

الموجات الموقوفة والمتحركة

إن أبسط الموجات على جسم ممتد ذي أبعاد محدودة هي موجات موقوفة. بأزمانها الدورية و/أو أنماطها المختلفة، فإن هذه الموجات الموقوفة يمكنها أن تتراكب لتُشكّل أي موجة ممكنة في ذلك الجسم المحدود.

إن أبسط الموجات على جسم ممتد ذي أبعاد غير محدودة هي موجات متحركة. بأزمانها الدورية و/أو اتجاهات حركتها المختلفة، فإن هذه الموجات المتحركة يمكنها أن تتراكب لتشكّل أي موجة ممكنة على ذلك الجسم اللامحدود.

في الحقيقة، رأينا هذه الأفكار من قبل ضمن سياق الآلات الموسيقية والصوت. بما أن الآلات هي أجسام محدودة، فإن اهتزازاتها الأساسية هي موجات موقوفة - الاهتزاز الأساسي والنغمات الإضافية. ولأن الهواء هو فعليا غير محدود، فإن اهتزازاته الأساسية هي موجات متحركة - الموجات الصوتية التي يحملها. إن جَرْس الآلة يكشف تراكب موجاتها الموقوفة المتعددة، بينما الصوت الكامل لأوركسترا أو فرقة موسيقية يعرض تراكب موجاتها المتحركة المتعددة.

كل من موجات الماء السطحية الموقوفة والمتحركة تحمل طاقة، طاقة تحصل عليها في العادة من الرياح، أو المد، أو بين الحين والآخر من نشاط زلزالي. تتكون طاقة كل موجة من طاقة حركية في الماء المتحرك وطاقة جذب كامنة في الماء الذي تم إزاحته عن المستوى.

في الموجة الموقوفة، تتذبذب طاقة الموجة بأكملها ذهابا وإيابا بين حركية وجذب كامنة؛ تصل الطاقة الحركية للموجة ذروتها عندما يندفع السطح خلال مستوى اتزانه، وتصل طاقتها الكامنة ذروتها عندما يتوقف السطح ويستدير عند أقصى إزاحة له عن الاتزان.

تتحرك قمم وقيعان موجة متحركة بثبات إلى الأمام، لذلك فإن الماء ليس مستويا أو عديم حركة أبدا. وبالتالي تكون الطاقة في الموجة المتحركة دائما مزيجاً متعادلاً من الطاقات الحركية والكامنة. وبسبب حركتها المتجهة، تحمل الموجة المتحركة كمية حركة متجهة في نفس اتجاه سرعة الموجة.

تحقق من فهمك # ٣: تردد دوار البحر (للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

أنت تجلس في زورق صغير على المحيط المفتوح، ترتفع وتنخفض مع كل قمة موجة عابرة. كيف يمكنك أن تقيس تردد الموجة العابرة تحت زورقك؟



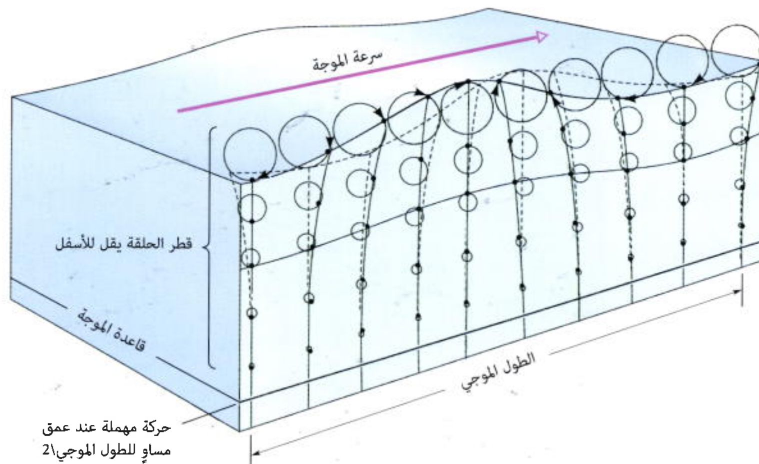
شكل ٦,٣,٩: يمكنك أن ترى أن الماء لا يتحرك مع الموجة بمراقبة قنينة تطفو على الماء. تتحرك القنينة في مسار دائري بمرور كل قمة بالقرب منها. بدءاً عند (أ) قمة، تتحرك القنينة (ب) للأسفل واليمين، ثم (ج) للأسفل واليسار، ثم (د) للأعلى واليسار، وبعدها (هـ) للأعلى واليمين. تعود القنينة لموضعها الأصلي عند قدوم القمة التالية.

تركيب الموجة المائية

لقد رأينا أن الموجة السطحية المتحركة تتحرك عبر المحيط المفتوح بسرعة وطول موجي وتردد محدد. لكن ماذا يعمل الماء ذاته أثناء مرور الموجة؟

يمكنك أن تبدأ بالإجابة على ذلك السؤال بمراقبة قنينة تطفو على سطح الماء (شكل ٦,٣,٩). حينما تمر موجة بالقنينة، فإنها سترتفع وتنخفض مع القمم والقيعان، لكنها لا تُحدث أي تقدم إجمالي في أي اتجاه. بدلا من ذلك، تسير القنينة في مسار دائري. مثل القنينة، الماء نفسه لا يتحرك في الواقع مع الموجة العابرة. بالرغم من أن هذا الماء يتجمّع لتكوين كل قمة وينبسط لتكوين كل قاع، إلا أنه يعود لنقطة بدايته بمجرد أن تغادر الموجة.

مثل القنينة في الشكل (٦,٣,٩)، فإن قطعة من الماء على سطح المحيط تتحرك في نمط دائري (شكل ٧,٣,٩) عند مرور موجة متحركة. الماء الذي يبدأ فوق قمة يتحرك للأسفل وللأمام بينما تغادر القمة. ويتحرك للأسفل وللخلف عند قدوم قاع، وبعدها للأعلى وللخلف عند مغادرة القاع، وأخيرا للأعلى وللأمام عند قدوم القمة التالية. عندما يصل لذروة القمة القادمة، يكون هذا الماء قد عاد لنقطة بدايته على سطح المحيط. الاتجاه الذي يدور فيه الماء يعتمد على اتجاه سرعة الموجة – اتجاه حركة الموجة. الماء في ذروة القمة يتحرك دائما في نفس اتجاه الموجة نفسها.



شكل ٧,٣,٩: يتحرك سطح الماء في حركة دائرية حينما تمر موجة. الماء الذي يقع حاليا عند كل نقطة سوداء سيتبع المسار الدائري المخطط حوله مع مرور الزمن. الدوائر تكون أكبر ما يمكن عند السطح وتُصبح غير مهمة نسبيا بمجرد أن تنظر لبعد أكبر من نصف طول موجي تحت السطح. إن الإحساس بالحركة الدائرية (مع أو عكس عقارب الساعة) يحدد الاتجاه الذي تسير به الموجة. هذه الموجة تتحرك باتجاه اليمين.

إنه ليس فقط الماء على السطح هو الذي يتحرك؛ بل الماء تحت السطح يتحرك أيضا في مسارات دائرية. ولكن تتناقص أنصاف أقطار الدوائر تدريجياً مع العمق وتصبح مهملة عند عمق يساوي تقريبا نصف الطول الموجي للموجة. فمع أنها تسمى موجة سطحية، إلا أن لها عمقاً مرتبطاً بها وبالتالي حساسية للماء الضحل، كما سنرى قريبا.

هذه الموجات السطحية لها خاصية مثيرة أخرى: تزداد سرعتها الموجية بزيادة الطول الموجي. كما قد تكون قد لاحظت، تسير الموجات ذات الطول الموجي الطويل أسرع من الموجات ذات الطول الموجي القصير. هذا مختلف تماما عن الموجات الصوتية، والتي جميعها لها نفس السرعة بغض النظر عن الطول الموجي. مثل هذا الاعتماد لسرعة الموجة على الطول الموجي يُعرف بالتشتت. يحدث في هذه الحالة لأن سطح الماء متصلّب بشكل مدهش عند حمل موجات ذات أطوال موجية طويلة. على خلاف وتر متوتر، والذي يقاوم تشوهات الأطوال الموجية القصيرة بتصلّب أشد من تشوهات الأطوال الموجية الطويلة، فإن سطح الماء يستخدم وزنه لمقاومة اضطرابات الأطوال الموجية الطويلة بنفس الشدة تقريباً التي يقاوم بها اضطرابات الأطوال الموجية القصيرة. ذلك التصلب العالي للموجات ذات الأطوال الموجية الطويلة يزيد من تردداتها وبالتالي يزيد من سرعاتها الموجية (انظر معادلة ١,٢,٩).

الموجات الصغيرة لها أطوال موجية قصيرة وتتحرك ببطء، بينما موجات المحيط الكبيرة لها أطوال موجية طويلة وتتحرك بسرعة أكبر. الموجات العملاقة والناتجة من الزلازل وثوران البراكين، والمعروفة بالسونامي، لها أطوال موجية طويلة جدا ويمكنها أن تتحرك بسرعة مئات من الكيلومترات في الساعة. بما أن هذه الموجات العملاقة تسير بسرعة عالية وتحرك الماء عند عمق كبير في المحيط، فإنها تحمل كميات هائلة من الطاقة وكمية الحركة وتعد كارثة للمناطق الساحلية (شكل ٨,٣,٩).

تحقق من فهمك # ٤: تحت الأمواج

(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

إذا كنت تسبح وأردت الغوص تحت موجة، ما العمق الذي يجب أن تصل له لتتجنب أي حركة ذات تأثير في الماء؟

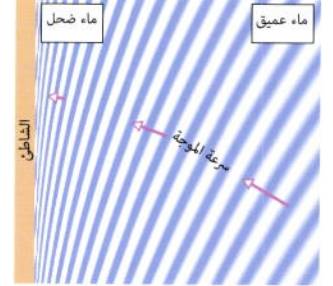


شكل ٨,٣,٩: بدأ سونامي المحيط الهندي الذي حدث في ٢٦ ديسمبر عام ٢٠٠٤م بارتفاع مفاجئ في قاع المحيط بالقرب من الساحل الشمالي لسومطرة. هذه الموجة المتحركة ذات الطول الموجي الطويل تحركت بسرعة كبيرة خلال المحيط الهندي بحيث لم يتلق معظم سكان الشواطئ أي إنذار فلم يكونوا على استعداد. إضافة لذلك، كشفت قيعان الموجات الهائلة مناطق ممتدة من قاع البحر، فجذبت أناساً فضوليين على الشاطئ والذين أصبحوا غير محميين من القمم المدمرة التي تبعت تلك القيعان. هلك حوالي ربع مليون شخص.

الموجات عند الشاطئ

بينما تقترب موجة من الشاطئ، تبدأ بالسير خلال مياه ضحلة. بما أن حركة الماء الدائرية تمتد تحت السطح، فإنه يأتي موضع تبدأ فيه الموجة بمواجهة قاع البحر. بمجرد أن تكون ضحالة الماء أقل من نصف الطول الموجي للموجة، فإن قاع البحر يشوه حركة الماء الدائرية بحيث تصبح بيضاوية الشكل.

هذا التغير له عدد من التأثيرات المثيرة على الموجة. أولا: تتناقص سرعتها الموجية تدريجيا بحيث تبدأ القمم بالتجمع سوية. ثانيا: تتزايد سعة الموجة - أي ارتفاع قممها وعمق قيعانها - أثناء ما تعمل الموجة على إبقاء كمية حركتها الأمامية الإجمالية ثابتة بالرغم من تناقص سرعتها. هذان التأثيران يفسران لماذا الموجات التي تبدو عريضة وتدريجية على سطح المحيط المفتوح تبدو منحدرة وخطرة جداً بالقرب من الشاطئ. إن قممها قد تجمعت سوية وأصبحت مرتفعة، لذا فإن الميل بين القمم والقيعان أصبح في الحقيقة أشد انحدارا.



شكل ٩,٣,٩: عندما تواجه موجة الماء السطحية المتحركة ماءً ضحلاً، فإنها تتباطأ ويتغير اتجاه حركتها. عملية الانكسار هذه تعطف سرعة الموجة بحيث تشير مباشرة نحو الشاطئ.

تأثير ثالث لضحالة الماء هو التغير التدريجي في اتجاه سير الموجة. هذا الانعطاف يُعرف بالانكسار، ويحدث كلما تغيرت سرعة الموجة عندما تمر من بيئة لأخرى. بما أن موجة ماء سطحية تتباطأ عند اقترابها من الشاطئ، فإن تلك الموجة تنكسر - أي تنعطف - لكي تتجه مباشرة نحو الشاطئ (شكل ٩,٣,٩). بسبب الانكسار، تقترب الموجات من الشاطئ بشكل متعامد عليه تقريباً، حتى وإن كانت تسير بزوايا منحرفة نسبيا بعيدا عن الشاطئ.

تأثير رابع وأخير هو تحطم الموجة - في النهاية تستنفد الموجة الماء وترتطم بالشاطئ. تبني الموجة كل واحدة من قممها باستخدام الماء المحلي. عندما تدخل القمة منطقة الماء الضحلة جدا، لا يوجد ماء كافٍ أمامها لتبني جانبها الأمامي. تصبح القمة غير مكتملة وتبدأ «بالتكسر».

يعتمد شكل زوال الموجة على ميل قاع البحر. إذا كان ذلك الميل تدريجياً، فإن الموجة تنكسر ببطء لتكوّن أمواجاً متكسرة ملساء متدرجة و«هائجة» (شكل ١٠,٣,٩). لكن إذا كان ميل قاع البحر شديد الانحدار، فإن الموجة تتكسر بسرعة بقيام ذروة قمتها بالغوص للأمام فوق القاع الذي أمامها (شكل ١١,٣,٩). إن الميل الشديد الانحدار يمنع أساساً تكوّن النصف الأمامي من القمة. يستمر النصف الخلفي خلال حركته الدائرية الطبيعية ويغوص فوق نصف القمة المفقودة أمامه.

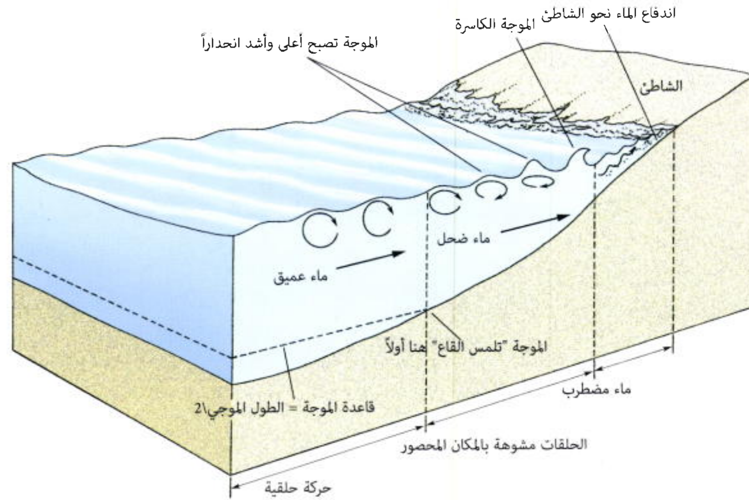
بإذن لو بلومفيلد



شكل ١٠,٣,٩: عندما يكون ميل قاع البحر تدريجيا، فإن قمم الموجة تتكسر بلطف لتكوّن أمواجاً متكسرة متدرجة.

دون ولايسا كينغ\بنك الصور\صور غيتي





شكل ١١,٣,٩: عندما يصبح الماء ضحلا جدا بحيث يمنع تكوين قمة كاملة للموجة، فإن الموجة «تنكسر». إذا كان ميل الشاطئ منحدراً بشكل كافٍ، فإن القمة ستكون غير مكتملة في الجانب القريب من الشاطئ وستغوص للأمام فوق القاع الذي أمامها.

ولكن الموجة يمكن أن تتفادى هذه النهاية العنيفة بالاصطدام بجدار البحر أو منحدر صخري بدلا من الشاطئ. بدلا من الانكسار، فإن الموجة سترتد من على الجدار وتستمر في اتجاه جديد. هذا التأثير الارتدادي يُعرف بالانعكاس، ويحدث كلما تغيرت خصائص ديناميكية معيّنة للموجة، وخاصة سرعتها، بشكل مفاجئ حينما تمر من بيئة لأخرى. في هذه الحالة، ستضطر موجة الماء السطحية أن تتغير بشكل جذري لتدخل للجدار البحري أو المنحدر الصخري، فبدلاً من ذلك تنعكس بشكل مثالي تقريبا. ولكن حتى التغيرات الأقل صرامة في البيئة يمكن أن تجعل الموجة ترتد، حتى وإن كان جزئيا. وهكذا عندما تمر موجة ماء سطحية فوق مرتفع رملي أو شق مرجاني وتتغير سرعتها الموجية، فإنها قد تواجه كلا من الانعكاس والانكسار. تساهم هذه التأثيرات في الديناميكا المعقدة للموجات بالقرب من الشاطئ.

تحقق من فهمك # ٥: مجاوزة الموجة المنكسرة

(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

حينما تسبح في محيط مبتعدا عن الشاطئ، تمر بمنطقة تتكسر فيها قمم الموجات ثم تصل منطقة أبعد لا تتكسر فيها الموجات. ما الذي يميّز هاتين المنطقتين؟

إيقاع الأمواج: تداخل الموجات

إذا كان المحيط يحمل فقط موجة متحركة واحدة صافية نـحو الشاطئ، فإن كل موجة منكسرة سوف تبدو شكليا وسمعيا متشابهة. ولكن، في الغالب هناك إيقاع معقّد للأمواج المرتطمة؛ إذ تتذبذب جهارة صوتها وفق نمط إجمالي يُعرف بضرب الأمواج. ضرب الأمواج هو إشارة بأن سطح المحيط هو مكان نشط: في الواقع هو يحمل أكثر من موجة متحركة واحدة في الوقت نفسه وهذه الموجات المختلفة تساهم جميعها في الأمواج.

لفهم كيفية إنتاج الموجات المتحركة المتعددة لضرب الأمواج، دعنا نتأمل حالة بسيطة. افترض أن موجتين متحركتين تتجهان نـحو الشاطئ وأن لهما سعتين متساويتين لكن أطوالهما موجية مختلفة (شكل ١٢,٣,٩). مثل هذه الحالة يمكن أن تنشأ عندما تُنتج الرياح فوق منطقتين من المحيط موجتين متحركتين مختلفتين تتداخلان في وقت لاحق. بما أنهما تتشاركان في سطح المحيط، فإنهما تتراكبان فوق بعضهما البعض.

بما أن هاتين الموجتين المتحركتين مختلفتان، فإن أنماطهما من القمم والقيعان لا يمكنهما أن يتطابقا في كل مكان. بدلا من ذلك، تواجه هاتان الموجتان تداخلاً – تدعم أنماطهما المتراكبة بعضها البعض في مواقع معينة وتُلغي بعضها البعض في مواقع أخرى. كلما تتطابق قممها أو قيعانها فإنهما يواجهان تداخلاً بناء – فتعمل الموجتان سوية لإنتاج قمم أو قيعان عظيمة. ولكن كلما تتطابق قمة موجة مع قاع الموجة الأخرى، فإنهما يواجهان تداخلاً هدّاماً – فتعاكس الموجتان بعضها البعض لإنتاج قمم أو قيعان خامدة أو مختفية.

النتيجة هي نمط تداخل – أي تركيب مُعقّد ينتشر عبر المكان والزمان عندما تتراكب الموجات. يتحرك هذا النمط التداخلي على سطح المحيط ويتطور بينما تتجه الموجات المتحركة نـحو الشاطئ، ويترك بصمته على القمم التي تنكسر في النهاية على الشاطئ. بما أن هذه القمم لم تعُد متساوية في الارتفاع، فإنها تُظهر الإيقاع المعقد لضرب الأمواج. عندما تستمع لذلك الضرب، فأنت تسمع نتيجة التراكب وتداخل الموجات.

بالطبع، يحمل المحيط الحقيقي العديد من الموجات المتحركة، كلٌّ بسعتها وطولها الموجي واتجاه سيرها الخاص بها. لكن مهما كان سطح المحيط مُعقّدا ومهما كان ضرب السطح معقّدا، فإنك مازلت تشاهد تداخل الموجات فقط.

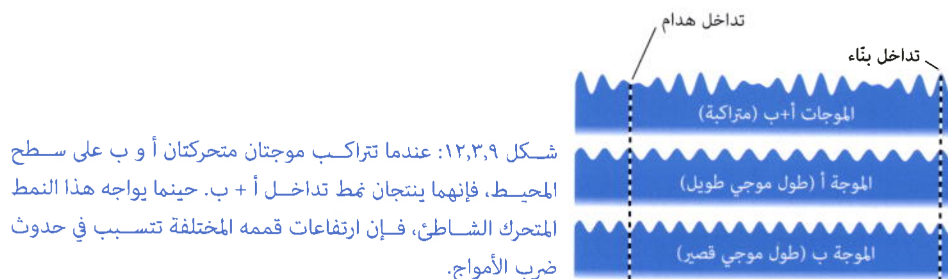
ملخص للظواهر الموجية المهمة

الانعكاس: إعادة التوجه الكاملة أو الجزئية للموجة كالمرآة والتي تحدث عندما تتغير بعض الخصائص الديناميكية لتلك الموجة بشكل مفاجئ، خصوصا سرعتها، عند عبورها من بيئة لأخرى.

الانكسار: انعطاف للموجة يحدث عندما تتغير سرعة تلك الموجة أثناء عبورها من بيئة لأخرى.

التشتت: اعتماد سرعة الموجة على طولها الموجي.

التداخل: عندما تتراكب موجتان أو أكثر، فإن قممها وقيعانها يمكنها أن تدعم بعضها البعض (تداخل بنّاء) أو تُلغي بعضها البعض (تداخل هدّام) وتُنتج نمط تداخل.



شكل ١٢,٣,٩: عندما تتراكب موجتان متحركتان أ و ب على سطح المحيط، فإنهما ينتجان نمط تداخل أ + ب. حينما يواجه هذا النمط المتحرك الشاطئ، فإن ارتفاعات قممه المختلفة تتسبب في حدوث ضرب الأمواج.

تحقق من فهمك # ٦: ضربات الصوت

(للإجابة، انظر صفحة ٢٨٩)

إن العديد من النغمات على البيانو تُعزف بواسطة اثنين أو حتى ثلاثة أوتار منفصلة. إذا لم تكن تلك الأوتار منضبطة عند نفس درجة الصوت، فإن الصوت الناتج له خاصية نبضية - يرتفع وينخفض الصوت بشكل إيقاعي. ما الذي يسبب هذا النبض الغريب أو الضرب؟

خاتمة الفصل التاسع

في هذا الفصل، نظرنا في الرنين الطبيعي في تشكيلة من الأجسام. في الساعات، فحصنا الرنين في البندول، وحلقات الاتزان، وبلورات الكوارتز ووجدنا أن هذه الأجسام هي متذبذبات توافقية - فتتناسب قوى إرجاعها مع الإزاحة. وهكذا، فإن مؤقتات الوقت هذه لها أزمنة دورية لا تعتمد على سعة حركتها.

في الآلات الموسيقية، فحصنا اهتزازات الأوتار والأعمدة الهوائية لرؤية أنها هي أيضا تتصرف مثل المتذبذبات التوافقية، لكن بوجود العديد من الأنماط الاهتزازية وبالتالي سلوكيات أكثر تعقيدا. وجدنا أنه يمكننا النظر لحركتها كموجات.

في البحر، استكشفنا إلى مدى أبعد نوعين مختلفين من الموجات: الموجات الموقوفة والموجات المتحركة. رأينا أن كلا نوعي الموجات موجود في الماء، مع ظهور الموجات الموقوفة كرنين مدي جزري والموجات المتحركة تتحرك على المحيط المفتوح.

تفسير: الكأس الزجاجية الغنائية

إن فرك شفة الكأس الزجاجية يُشابه تحريك القوس على وتر الكمان؛ كلتا العمليتين تتسبب في انتقال الطاقة الرنيني. إصبعك يدفع على الكأس ثم ينزلق بالتبادل، فيساعد الكأس نفسها على الاهتزاز ذهابا وإيابا تحت إصبعك في نمطها الاهتزازي الأساسي. حينما تبدأ الكأس بالاهتزاز، فإن إصبعك يقوم بشغل قليل عليها كلما تتحرك الكأس في نفس اتجاه إصبعك. بمجرد أن تُغني الكأس بصوت مرتفع، يمكنك أن تبقيها مغنّية بإدارة إصبعك حول الكأس بثبات. بالرغم من أن الكأس تستمر في إصدار طاقتها كصوت، فأنت تستمر في إعطائها طاقة أكثر بالقيام بشغل عليها بإصبعك. إضافة ماء للكأس تزيد من قصورها وتُبطئ اهتزازاتها.

ملخص الفصل

كيفية عمل الساعات

تستند الساعات في الغالب على المتذبذبات التوافقية بسبب أزمنتها الدورية المستقرة جدا. والأكثر أهمية أن الزمن الدوري لمتذبذب توافقي لا يعتمد على سعة حركته. تشتمل مؤقتات الوقت المعتادة المستندة على المتذبذبات التوافقية على بندول، وحلقات اتزان، وبلورات كوارتز.

في ساعة البندول، يتحكم البندول المتأرجح بدوران عجلة مسننة، والتي بدورها تتحكم بدوران عقارب الساعة. تأتي الطاقة اللازمة لإبقاء البندول متأرجحا وتقديم العقارب من هبوط ثقل معلق بسلك. في ساعة الاتزان، تتحكم حلقة اتزان متأرجحة بعجلة مسننة. تأتي الطاقة اللازمة لهذه الساعة من زنبرك ملفوف. تكتشف ساعة بلورة الكوارتز اهتزاز بلورتها إلكترونيا وتستخدم ذلك الاهتزاز للتحكم في محرك يقوم بتقديم عقاربها أو تستخدم دائرة إلكترونية تقيس الزمن عن طريق عدّ اهتزازات البلورة. توفّر نبضات كهربائية صغيرة مؤقتة بعناية خارجة من الساعة الطاقة التي تُبقي البلورة مهتزة.

كيفية عمل الآلات الموسيقية

يوضح وتر الكمان الرنين الطبيعي بالاهتزاز ذهابا وإيابا حول شكله الاتزاني، الخط المستقيم. تحريك الوتر بالقوس يتسبب في اهتزازه بدفعه بعيدا عن شكله الاتزاني ثم السماح له بالعودة لشكله.

ينقل القوس طاقة للوتر المهتز بدفعه كلما تحرك في اتجاه القوس. تُحدد درجة صوت الوتر الأساسية بكتلته، وتوتره، وطوله، ويقابل ذلك موجة موقوفة على الوتر. بعد اختيار وتر له كتلة مناسبة، تقوم بضبط ذلك الوتر بتعديل توتره. أثناء العزف، تقوم بتغيير طول الوتر ودرجة صوته بالضغط عليه على لوحة العفق. يخدم جوف الكمان تحويل اهتزاز الوتر إلى صوت بالتحرك

للداخل والخارج حينما يهتز الوتر.

إن الهواء داخل أنابيب الأورغن يوضح أيضاً رنينا طبيعيا. حينما ينفخ الأورغن هواء عبر فتحة في قاع الأنبوب، فإن الهواء داخل ذلك الأنبوب يبدأ بالاهتزاز كموجة موقوفة. يتحدد تردد هذا الاهتزاز أساسياً بطول الأنبوب، بحيث يكون للأنبوب القصير درجة صوت أعلى من الأنبوب الطويل. تنتج الأنابيب ذات الأشكال المختلفة مقادير مختلفة من التوافقيات وأصوات مختلفة.

سطح الطبل له رنين طبيعي، لكن باختلاف: هو ليس توافقيات لدرجة الصوت الأساسية. تساهم الموجات الموقوفة المعقدة على جلدة الطبل في صوتها المميز.

كيفية عمل البحر

يعرض البحر حركتين مثيرتين: المد والجزر والموجات. يحدث المد والجزر بسبب بروزات في محيطات الأرض، والتي تنشأ من قوى جاذبية القمر والشمس. يسيطر القمر على المد والجزر بحيث تظهر البروزات في المناطق التي تكون أقرب وأبعد ما يمكن بالنسبة للقمر. بما أن الأرض تدور حول نفسها، فإن هذه البروزات تتحرك بالنسبة لبقعة الأرض وتُعطي للمد والجزر دورته التي تستغرق 12.5 ساعة.

تحدث الموجات لأن سطح الماء له اتزان مستقر. عندما ينزاح عن ذلك الاتزان المستوي الأفقي، فإن هذا السطح سيتذبذب. أبسط تذبذباته هي موجات موقوفة على كتل الماء المحصورة وموجات متحركة على الماء المفتوح.

إن الموجات الصغيرة المألوفة على سطح المحيط هي موجات متحركة تتجه نحو الشاطئ بسرعات تزيد بزيادة الطول الموجي. حينما تقترب من الشاطئ، تُشكّل هذه الموجات قمماً ناقصة، والتي تتكسر بعد حين. إن الماء الضحل أيضا يبطئ الموجات، بحيث تنعطف أكثر نحو الشاطئ مباشرة. وتأثيرات التداخل بين الموجات المتحركة المتعددة تتسبب في حدوث أنماط معقدة على سطح الماء وإيقاعات معقدة في الأمواج المتحطمة.

قوانين ومعادلات مهمة

١. المتذبذب التوافقي: هو متذبذب تتناسب قوة إرجاعه مع الإزاحة. يعتمد زمن تذبذبه الدوري على صلابة قوة إرجاعه وعلى كتلته فقط، وليس على سعة تذبذبه.

٢. العلاقة بين سرعة الموجة، وطولها الموجي، وترددها: سرعة الموجة تساوي حاصل ضرب الطول الموجي في التردد، أو

سرعة الموجة = الطول الموجي × التردد (١،٢،٩)

تحقق من فهمك - الإجابات

٩-١ الساعات

١. بما أن الضوء يسير بسرعة ثابتة، فإن المسافة التي يقطعها تساوي حاصل ضرب سرعته في زمن سيره. إذا عرفت زمن السير والسرعة، فيمكنك أن تُحدد تلك المسافة.

لماذا: يتم العديد من قياسات المسافة بقياس الزمن. يستخدم المساحون بشكل دوري زمن سير الضوء لقياس المسافات. وكثيراً ما يستخدم المخططون والمزخرفون زمن سير الصوت لقياس المسافات بين الجدران. في العموم، يمكن استخدام حركة جسم بسرعة ثابتة إما لقياس المسافة المقطوعة إذا كنت تعلم الزمن المنقضي أو لقياس الزمن المنقضي إذا كنت تعلم المسافة المقطوعة.

٢. يمكن أن تكون قد خسرت ما يُعادل 80 دقيقة بعد 24 ساعة.

لماذا: إذا انتظر عامل الساعة الرملية 10 ثوان قبل قلبها كلما ينفد الرمل، فإن الساعة ستخسر 10 ثوان كل 3 دقائق، أي 200 ثانية كل ساعة ، و4800 ثانية كل يوم. إذا أمكنك أن تتأكد أن العامل سينتظر دائما 10 ثوان، يمكنك أن تُضمّن ذلك في تصميم الساعة. ولكن العامل قد يكون سريعاً في إحدى المرات أكثر من الأخرى، وهذا الشك يجعل الساعة لا يُعتمد عليها وغير دقيقة. لكي تكون الساعة التكرارية دقيقة في الزمن، فإنها يجب أن تكرر حركتها بانتظام تام تقريبا.

٣. قوة جاذبية الأرض وطول سلسلة الأرجوحة.

لماذا: الطفل المتأرجح في أرجوحة هو شكل من أشكال البندول. كما هو الحال في أي بندول، يُحدد الزمن الدوري لحركة الطفل بقوة الجاذبية وطول البندول فقط. في هذه الحالة، طول البندول هو تقريبا طول السلسلة الداعمة للأرجوحة. وهكذا، الأرجوحة الطويلة لها زمن دوري أطول من الأرجوحة القصيرة.

٤. ستتناقص سعة حركتها تدريجيا إلى أن تتوقف.
لماذا: لإبقائها تتأرجح، يجب أن تعوّض الطاقة التي تفقدها بسبب الاحتكاك ومقاومة الهواء. بدفعها إلى الأمام كلما تتحرك بعيدا عنك، فأنت تبذل شغلا عليها وتزيد من طاقتها. لكن عندما تدفعها أثناء تحركها نحوك، فهي تقوم ببذل شغل عليك وأنت تنتزع جزءاً من طاقتها. فأنت عندئذ تبطئها بدلا من أن تُبقيها على حركتها.

٥. تصلب التفاف الحبل الداعم للثريا والكتلة الدورانية للثريا.
لماذا: الثريا المعلقة هي متذبذب توافقي. يُعارض حبلها الداعم أي التفاف ببذل قوة إرجاع على الثريا. بمجرد أن تلفها بعيدا عن وضعها الاتزاني، فإن الثريا تتذبذب ذهابا وإيابا بزمن دوري يُحدده فقط تصلب لي الحبل (تصلبه بالنسبة للّي) والكتلة الدورانية للثريا. كما هو في أي متذبذب توافقي، لا تؤثر سعة حركة الثريا على زمنها الدوري.

٦. يهتز القضيب كمتذبذب توافقي، فيقترب نصفاه أولا نحو بعضهما البعض ثم يتباعدان.
لماذا: يهتز القضيب المعدني بنفس سلوك بلورة الكوارتز. يبذل جسم القضيب قوى إرجاع على نصفيه. بعد الارتطام بالأرض، يتحرك هذان النصفان نحو بعضهما البعض وبعيدا عن بعضهما البعض بسرعة، مصدرا النغمة التي تسمعها. بما أنه متذبذب توافقي، فإن تردد (ودرجة صوت) النغمة لا تتغير حينما تتناقص سعة الحركة.

٩-٢ الآلات الموسيقية

١. هناك معامل مقداره أربعة في التردد بين أدنى وأعلى العلامات التي يمكن أن يغنيها الصوت.
لماذا: بما أن العلامات التي يفصل بينها ثمانية يفصل بينها معامل ٢ في التردد، فإن العلامات التي يفصل بينها ثمانيتان يفصل بينها معامل ٤ في التردد.

٢. يتزايد تردد نمط الاهتزاز الأساسي لوتر بزيادة توتره.
لماذا: أي وتر مشدود بقوة من أطرافه سيُظهر رنينا طبيعيا مثل الذي في وتر الكمان. كلما كان الوتر مشدوداً أكثر، ارتفعت ترددات ذلك الرنين.

٣. حبل القفز هو في الأساس وتر مهتز. نمط اهتزاز نصفي الحبل هو النمط التوافقي الثاني، بتردد اهتزازي هو ضعف اهتزاز القوس الأساسي العادي.
لماذا: بالرغم من أنه يتأرجح بشكل دائري، إلا أن حبل القفز يهتز للأعلى وللأسفل في نفس وقت اهتزازه للأمام وللخلف. ينشئ هاذان الاهتزازان سوية الحركة الدائرية. لجعل الحبل يهتز في نمطه التوافقي الثاني (كنصفي حبل) دون تغيير توتره، يجب أن يتأرجح بضعف سرعة التأرجح العادي.

٤. الجسم له رنين طبيعي عند تردد النغمة، والاهتزاز المتجانس ينقل الطاقة للجسم.
لماذا: تتحرك الطاقة بسهولة بين جسمين يهتزان عند نفس التردد. النغمة المعزوفة على آلة معينة ستتسبب في عزف نفس النغمة على آلة أخرى. حتى الأجسام المعتادة ستُظهر اهتزازاً متجانساً عندما تتواجد النغمة الملائمة في الهواء.

٥. الماء يقصّر طول عمود الهواء المتحرك داخل القنينة ويزيد تردد نمطها الاهتزازي الأساسي.
لماذا: القنينة في الأساس هي أنبوب مفتوح من طرف واحد فقط. للقنينة نمط اهتزاز أساسي بتردد هو نصف تردد أنبوب مفتوح له نفس الطول. حينما تضيف ماء للقنينة، فأنت تقصّر الطول الفعّال للأنبوب وترفع من درجة صوته.

٦. بالنفخ عبر الفتحة، فأنت تسمح للهواء المهتز في القنينة بإعادة توجيه نَفَسَك بحيث يدعم الاهتزاز. إن النفخ لداخل فتحة القنينة فقط يضغط الهواء داخل القنينة.
لماذا: مثل قوس الكمان الذي يتحرك عبر الأوتار، فإن نَفَسَك الذي يتحرك عبر فتحة القنينة يدعم اهتزاز الهواء عن طريق انتقال الطاقة الرنيني. إن إعادة التوجيه التلقائي لنَفَسَك عندما تنفخ عبر فتحة القنينة سيؤدي لدفعات إيقاعية متزامنة تماما مع اهتزاز الهواء.

٧. يتسبب الارتطام البعيد عن المركز في اهتزاز السطح عند أنماطه الإضافية غير الدائرية. في أبسط هذه الأنماط (شكل ٩،٢،٩ ب) يتحرك جانباه في اتجاهين متعاكسين.
لماذا: الترامبولين في الأساس هو جلدة طبل والأطفال يركبون على أنماطه الاهتزازية. الارتطامات البعيدة عن المركز يمكن أن تتسبب في اهتزاز السطح عند أنماطه الإضافية، وهذه يمكنها أن تقذف الأطفال في اتجاهات غير متوقعة.

٨. يسير الصوت بسرعة أكبر في الهيليوم منها في الهواء العادي.
لماذا: بسبب كثافته وقصوره المنخفض، يهتز الهيليوم أسرع من الهواء عندما يحمل الغازان موجات صوتية لها أطوال موجية متساوية. بما أن السرعة التي يتحرك بها الصوت ذو الطول الموجي المعيّن تتناسب مع تردد ذلك الصوت، فإن السرعة الموجية في الهيليوم هي أكبر منها في الهواء.

٩. لنقل طاقة الوتر الاهتزازية إلى الهواء.
لماذا: أوتار القيثارة ضيقة جدا بحيث لا تستطيع أن تدفع على الهواء بفعالية وتصدر صوتاً. الأفضل لها أن تنقل طاقتها لجسم القيثار الصوتي بحيث يمكن لأسطحه المستوية أن تدفع على الهواء. يتجنب القيثار الكهربائي الحاجة لصندوق صوت بتحويل اهتزازت الوتر مباشرة إلى تيارات كهربائية ومن ثم إلى تحركات في سماعات صوتية.

٩-٣ البحر

١. مد عالٍ أيضا.
لماذا: عندما يواجه الجانب الأطلسي لبرزخ أمريكا الوسطى مداً عالياً، فإن هناك بروزاً فوق أمريكا الوسطى كلها. يواجه كلا جانبي البرزخ نفس المد (العالي).

٢. عدة أيام.

لماذا: يتحصل الماء المتدفق في خليج فندي على طاقته عن طريق انتقال الطاقة الرنيني. المد والجزر يبذلان شغلا على الماء، فيزيدان طاقته ببطء بعد العديد من دورات حركته التكرارية. بما أن كل دورة تستغرق نصف يوم، فإنه يتطلب العديد من الأيام لتجميع الطاقة اللازمة لتكوين مد عملاق. إذا استطعت استخلاص كل هذه الطاقة المختزنة مرة واحدة، فإن الخليج سيضطر أن يبدأ بالتدفق من جديد.

٣. تقوم بعدّ عدد مرات دورات الارتفاع والانخفاض التي تتمها في مقدار معيّن من الوقت.

لماذا: تحدث حركة زورقك للأعلى وللأسفل بسبب التذبذبات في سطح المحيط. أنت ترتفع وتنخفض بنفس تردد الموجة العابرة.

٤. يجب أن تغوص لحوالي نصف طول موجي تحت سطح الماء.

لماذا: تتسبب الموجة في حدوث حركة في الماء إلى حد عمق يعادل نصف طولها الموجي تقريبا. الموجة الاعتيادية لها طول موجي يساوي حوالي ٥ أمتار، فيجب أن تغوص ٢,٥ متر تحت سطح الماء قبل أن يظل الماء ساكنا تقريباً.

٥. المنطقة التي تتكسر فيها الموجة هي أكثر ضحالة من أن تتشكّل فيها قمم كاملة. المنطقة التي لا تتكسر فيها الموجة هي عميقة بشكل كافٍ لتكوين قمم كاملة.

لماذا: قمم الموجة تتكسر في المناطق الضحلة، حيث لا يمكن أن تتشكّل قمم كاملة. طالما أن الماء عميق بما فيه الكفاية، فإن الموجات تسير دون تكسر. لكن إذا كان هناك منطقة ضحلة مثل حاجز رملي، حتى وإن كان بعيدا جدا عن الشاطئ، فإن القمم قد تتكسر بينما تمر الموجة خلالها.

٦. إن الموجات الصوتية المختلفة بشكل طفيف والناتجة من أوتار منفصلة تواجه تداخلا.

لماذا: مثل موجات الماء المختلفة قليلا، فإن الموجات الصوتية المختلفة قليلا تظهر تأثيرات تداخل. النبض الناتج يعكس تداخلات بناءة وهدّامة متبادلة بين الموجات الصوتية ذات درجات الصوت المختلفة قليلا.

دقق في أرقامك - الإجابات

٩-٢ الآلات الموسيقية

١. حوالي 1420m/s (4700ft/s).

لماذا: من المعادلة (9.2.1)، سرعة الموجة في الماء يجب أن تكون 4.3 أضعاف سرعتها في الهواء. بما أن الموجات الصوتية لها سرعة موجية مقدارها حوالي 331m/s في الهواء، فيجب أن يكون لها سرعة حوالي 331m/s مضروبة في 4.3 أو 1420m/s في الماء.

تمارين

١. التسارع بسبب الجاذبية عند سطح القمر هو فقط حوالي سُدس المقدار على سطح الأرض. إذا أخذت ساعة بندول إلى القمر، هل ستتحرك أسرع، أم أبطأ، أم بنفس الوقت؟

٢. يوجد رف ملابس معلّق بسقف مخزن ويتأرجح ذهابا وإيابا. لماذا لا يعتمد الزمن الدوري لهذه الحركة على عدد الفساتين التي يحملها الرف؟ (أهمل كتلة الرف).

٣. إذا وقف طفل فوق مقعد أرجوحة في ساحة اللعب، كيف سيتأثر الزمن الدوري للأرجوحة؟

٤. إذا سحبت شجرة صغيرة لجانب ثم تركتها فجأة، فإنها ستتأرجح ذهابا وإيابا عدة مرات. الزمن الدوري لهذه الحركة لن يعتمد على المقدار الذي أحنيت به الشجرة. كيف تعتمد قوة الإرجاع التي تعيد الشجرة إلى وضعها القائم على المقدار الذي أحنيت به الشجرة؟

٥. سارية العلم هي متذبذبة توافقية، تنثني ذهابا وإيابا بزمن دوري ثابت. إذا أردت أن تزيد من سعة حركة السارية بدفعها بالقرب من قاعدتها، فمتى يجب أن تدفع - أثناء انثنائها نحوك أو بعيدا عنك؟

٦. اعتمادا على الطريقة التي قُطعت بها قاعدة كرسي هزّاز، فإن الزمن الدوري لحركته قد يعتمد أو لا يعتمد على قوة هزّك له. ماذا يمكنك أن تقول عن قوى الإرجاع التي تؤثر في هاتين الحالتين؟

٧. تقيس مسطرة إلكترونية بُعد جدار عن طريق ارتداد صوت من عليه. كيف يمكن أن تستخدم المسطرة مصدراً صوتياً، ومستقبلاً صوتياً وساعة لقياس بُعد الجدار؟

٨. أي من هذه الساعات ستحافظ على دقة الوقت إذا أخذتها إلى القمر: ساعة بندول، وساعة اتزان، وساعة كوارتز؟ لماذا؟

٩. لتعديل درجة صوت وتر قيثارة يمكنك أن تغيّر كتلته، أو توتره، أو طوله. لرفع درجة صوته، كيف يجب أن تغيّر كلاً من هذه الخصائص الثلاثة؟

١٠. لماذا تؤثر التغيرات في درجة الحرارة على درجة صوت وتر كمان؟

١١. تُصنع الأوتار التي تعزف أخفض النغمات على البيانو من سلك فولاذي سميك ملفوف بشكل حلزوني بسلك نحاس سميك. لا يُساهم النحاس تجاه التوتر في الوتر، فما الفائدة منه؟

١٢. لماذا تكون الأوتار التي لها أعلى درجات الصوت في معظم الآلات، بما في ذلك القيثار والكمان والبيانو، هي الأوتار الأكثر احتمالية للكسر؟

١٣. بعض الأجراس الهوائية تتكوّن من مجموعات من القضبان المعدنية والتي تُصدر نغمات عندما ترتطم بلسان الجرس المدفوع من قبل الهواء. تهتز هذه القضبان مثل مضرب البيسبول في شكل (٣,٢,٧). لماذا تُصدر القضبان الأطول نغمات ذات درجات صوت منخفضة مقارنة بالقضبان القصيرة؟

١٤. لماذا يؤدي استبدال الهواء في أنبوب الأورغن بغاز الهيليوم إلى رفع درجة صوته؟

١٥. الفلوت والفلوت الصغير (آلات نفخ موسيقية) كلاهما فعليا أنابيب مفتوحة في كلا الطرفين، مع وجود ثقوب على جانبيها للسماح لهما بإصدار نغمات أكثر. الفلوت الصغير هو نصف حجم الفلوت العادي تقريبا. كيف تُفسّر هذه الحقيقة كون نغمات الفلوت الصغير هي فقط ثمانية واحدة فوق نغمات الفلوت؟

١٦. إن أهم اختلاف بين الترمبيت والتوبا (نوعين من الأبواق) هو طول أنابيبهما. أنبوب التوبا أطول من أنبوب الترمبيت. كيف يؤثر هذا الفرق على درجات الصوت النسبية لهاتين الآلتين؟

١٧. في البحر الأبيض المتوسط، يكون المد العالي فقط ٣٠ سم فوق الجزر المنخفض. لماذا؟

١٨. لماذا يكون المد والجزر ضعيفين نسبيا بالقرب من القطبين الشمالي والجنوبي؟

١٩. إذا كنت تحمل كوباً مليئاً بالقهوة وأخذت خطواتك عند التردد الخاطئ، ستبدأ القهوة بالتأرجح بعنف في الكوب. ما الذي يتسبب في هذه الحركة النشطة؟

٢٠. عندما تقذف بحجر في بركة ماء ساكن، ستبدأ موجات صغيرة حلقية الشكل بالانتشار للخارج بسرعة معتدلة. لماذا تسير هذه الموجات الصغيرة بسرعة أبطأ مقارنة بالموجات على سطح المحيط؟

٢١. عندما تقذف حجراً في ماء هادئ، فإن موجات صغيرة تبدأ بالاتجاه للخارج على شكل دوائر متحدة في المركز. حينما يكبر محيط هذه الدوائر، فإن ارتفاعاتها تصبح أصغر. فسّر هذا التأثير بدلالة حفظ الطاقة.

٢٢. إذا سحبت ترامبولين للأسفل عند منتصفه ثم تركته، فإن سطحه سيتذبذب للأعلى وللأسفل عدة مرات. لماذا هذه الحركة هي مثال لموجة موقوفة؟

٢٣. لماذا يكون وتر الكمان المهتز للأعلى وللأسفل عند نمطه الاهتزازي الأساسي مثالاً لموجة موقوفة بدلا من موجة متحركة؟

٢٤. عندما تنقر خيط طائرة ورقية، فإن موجة صغيرة ستتجه لأعلى الخيط نحو الطائرة الورقية. لماذا تكون هذه الحركة مثالاً لموجة متحركة بدلا من موجة موقوفة؟

٢٥. حينما تعبر موجات فوق حاجز رملي ضحل، تتكسر أكبر الموجات. ما الذي يتسبب في تكسّر تلك الموجات ولماذا فقط أكبرها؟

٢٦. حتى وإن لم تتكسّر الموجات حينما تعبر فوق حاجز رملي (تمرين ٢٥)، يمكن ملاحظة الحاجز الرملي لأنك تستطيع رؤية قمم الموجات تتقارب من بعضها البعض. ما الذي يحدث ليسبب هذا التجمع؟

٢٧. يمكن للصوت أن يسير من كوب ورقي لآخر خلال وتر طويل مشدود يصل بين قاعيهما. هل الموجة المارة خلال الوتر طولية أم مستعرضة؟

٢٨. إذا دست بقوة على أرضية خشبية، يمكنك أن تجعل الأجسام الموجودة على طاولة قريبة تقفز قليلا. هل الموجات التي تسير خلال الأرضية طولية أم مستعرضة؟

٢٩. الطرْق على الصنج النحاسي غني بنغمات إضافية غير توافقية للنغمة الأساسية. لماذا النغمات الإضافية غير توافقية؟

٣٠. يُنتج الجرس القرصي الصيني صوتاً رنينياً عالياً له نغمات إضافية غير توافقية. لماذا النغمات الإضافية غير توافقية؟

٣١. القيثار ليس آلة ذات صوت عالٍ، لكن صوته سيكون أخفت إذا لم تكن أوتاره متصلة بقاعدة خشبية عريضة. ما الغرض الذي يحققه السطح الخشبي؟

٣٢. الكمان الأجهر هو آلة هائلة يصعب حملها في كل مكان. لماذا لا يمكنك مجرد دعم الأوتار الأربعة بواسطة قضيب معدني قوي وإهمال جميع البنية الخشبية؟

٣٣. تُصفّق بيديك وترسل موجة صوتية. هل هناك أي شيء تستطيع القيام به بعد ثانية من ذلك لإرسال موجة صوتية ثانية يمكنها أن تجتاز الموجة الأولى التي أرسلتها؟

٣٤. أسقطت عملة نقدية في بركة فأرسلت موجة سطحية في الماء. هل هناك أي شيء تستطيع القيام به بعد ثانية من الزمن لإرسال موجة سطحية في الماء تتجاوز الموجة الأولى التي أرسلتها؟

٣٥. إذا وقفت أمام مبنى حجري وصفقت بيديك، ستسمع صدى. ما الذي يحدث

للموجة الصوتية لإحداث هذا الصدى؟

٣٦. إذا وقفت خلف جدار صخري ضخم، ستواجه صعوبة في سماع شخص آخر يصفق يديه على الجانب الآخر. ما الذي يحدث للموجة الصوتية والذي يجعل من الصعب عليك سماعها؟

٣٧. حائل الأمواج في ميناء هو جدار صخري في الماء يمنع الموجات من الدخول إلى الميناء. أين تذهب طاقة الموجة بعد أن تصطدم بحائل الأمواج؟

٣٨. تميل الموجات للانعطاف نحو رؤوس على اليابسة تبرز لداخل المحيط وتُحدث تآكلاً عند تلك الرؤوس. ما الذي يتسبب في انعطاف الموجات نحو الرؤوس؟

٣٩. يدرك المتزلجون على الماء أن الموجات تنعطف حينما تعبر فوق الشقوق المرجانية. ما الذي يسبب هذا الانعطاف؟

٤٠. يمكن للنغمات الموسيقية أن تلبث في كاتدرائية صخرية لثوان عديدة. لماذا؟

٤١. إذا عزف عازفا كمان نغمات مختلفة بعض الشيء في الوقت نفسه، فإن الصوت الموحد له خاصية نبضية. ما الذي يسبب هذا النبض؟

٤٢. عندما تدور مروحتا طائرة بنفس المعدل تقريباً، فإن صوتهما الموحد يمكن أن يكون له خاصية نبضية. فسّر ذلك النبض.

المسائل

١. ما هو الطول الموجي لنغمة التوبا A2 (110Hz) في الهواء عند الشروط القياسية؟

٢. يعزف الفلوت الصغير نغمة A6 (1760Hz). ما هو الطول الموجي لتلك النغمة في الهواء عند الشروط القياسية؟

٣. عندما يعزف البيانو نغمة C4 (264Hz) في غرفة تحتوي على مزيج غير معتاد من الغازات، فإن الطول الموجي للصوت في ذلك الغاز هو 1.00m. ما هو سرعة الصوت في ذلك الغاز؟

٤. عند ارتفاع 3000m ودرجة حرارة قياسية (0°C)، فإن نغمة الكمان A4 (440Hz) لها طول موجي مقداره 0.725m. ما هي السرعة المحلية للصوت؟

٥. موجة ماء سطحية بتردد 0.3Hz لها طول موجي 17.3m/s. ما هي سرعتها الموجية؟

٦. موجة ماء سطحية لها سرعة موجية مقدارها 15.6m/s وتردد مقداره 0.1Hz. ما هو طولها الموجي؟

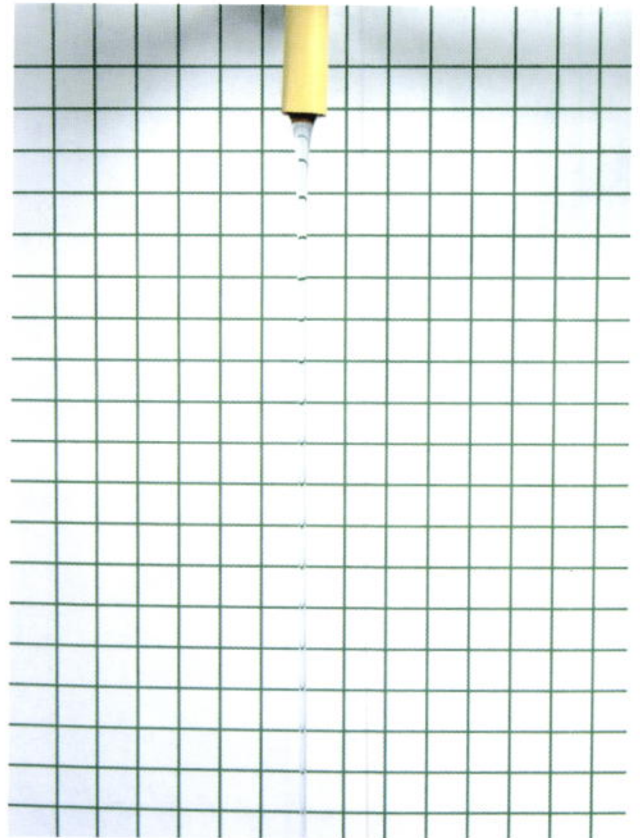
الفصل ١٠

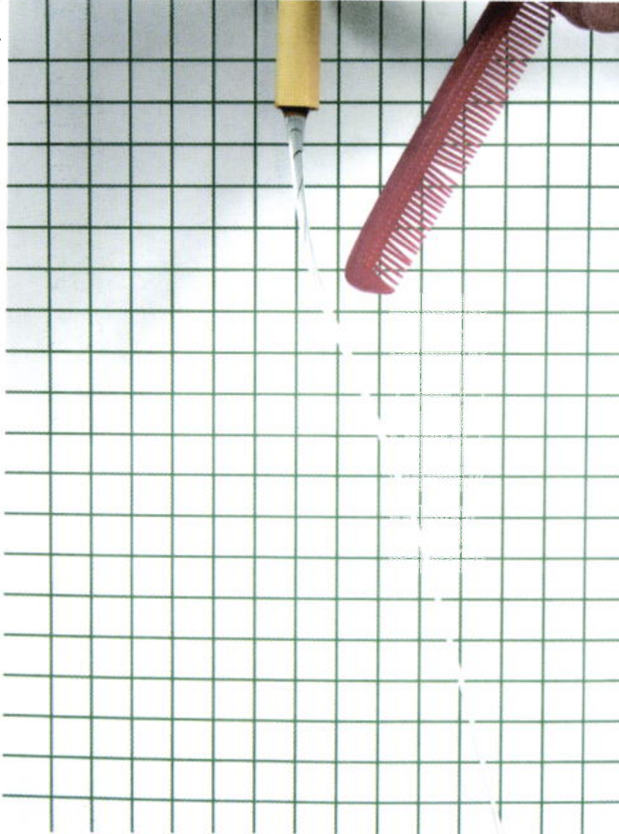
الكهرباء

الكهرباء في كل شيء من حولنا، في الشرارات والصدمات في يوم الشتاء البارد وفي إنارة مصباح ضوئي عندما تفتح مفتاحه. مع أنه من الصعب رؤية الشحنات الكهربائية المسؤولة عن الكهرباء، إلا أنه من السهل رؤية تأثيراتها. هذه الشحنات تؤدي العديد من الأغراض في الحياة الحديثة والتي نأخذها كأمر مسلّم به. إذا لم تكن توجد أي شحنات أو كهرباء، فإننا كنا سنجلس في الليل حول نار مشتعلة، نـحاول أن نُفكر فيما يمكننا أن نقوم به بدون تلفاز، أو هواتف نقالة، أو ألعاب الحاسوب. بالطبع، لن نستطيع التواجد أيضا. سواء كانت الكهرباء بلا حركة مثل الشحنات الساكنة أو متحركة مثل التيار الكهربائي، فإن الكهرباء بالفعل تجعل العالم يدور.

تجربة: تحريك الماء دون لمسه

على خلاف الجاذبية والتي دائماً تجذب الأجسام نـحو بعضها البعض، فإن القوى الكهربائية يمكن أن تكون تجاذبية أو تنافرية. يمكنك أن تقوم بتجربة بالقوى الكهربائية باستخدام تيار رفيع من الماء ومشط مشحون كهربائيا. أولا: افتح صنبور الماء قليلا بحيث يُشكّل تدفق الماء جديلة رفيعة لكن مستمرة تحت فتحة الصنبور. ثم أعطِ مشطك المطاطي أو البلاستيكي شحنة كهربائية بتمريره سريعا خلال شعرك أو فركه بعنف بكنزة صوفية. وأخيرا، امسك المشط بالقرب من التيار المائي، تحت الصنبور بقليل، وراقب ماذا يحدث للتيار. هل القوة الكهربائية التي تلاحظها تجاذبية أم تنافرية؟ لماذا تغيّر هذه القوة مسار الماء الساقط؟





بإذن لو بلومفيلد

إن فرك المشط خلال شعرك يجعله مشحونا كهربائيا. ابحث عن أجسام أخرى يمكنها أن تكتسب وتحافظ على شحنة عندما تفركها خلال شعرك أو قماش. حاول أن تتنبأ أي من هذه الأجسام ستنفع بشكل أفضل. والآن افرك هذه الأجسام لشحنها ولاحظ سلوكياتها. يمكنك أن تستخدم تيار الماء لقياس شحناتها. هل تحققت من تنبؤاتك؟ أيهما سيعمل بشكل أفضل: جسم معدني أم جسم عازل؟ لماذا؟

دليل الفصل

في حين أننا كثيراً ما نواجه القوى والتيارات الكهربائية كأشياء بديعة أو مزعجة، إلا أن هناك العديد من الأجهزة التي تعتمد عليهما. في هذا الفصل، سوف نفحص غموض (١) الكهرباء الساكنة وندرس جهازين حديثين يستندان على الكهرباء: (٢) الآلات الناسخة الجافة (الزيروغرافية) و(٣) الكشافات الضوئية. في قسم الكهرباء الساكنة، سوف ننظر كيف أن الملابس وأجساماً أخرى تكتسب شحنات وكيف تبذل قوى على بعضها البعض نتيجة لذلك. في قسم الآلات الناسخة، سوف نرى كيف أن تلك القوى الكهربائية نفسها تعمل سوية مع الضوء للتحكم في مواضع مسحوق أسود لإنتاج صور على أوراق. في قسم الكشافات الضوئية، سوف ننظر كيف أن تيارا من الشحنات الكهربائية تنقل الطاقة من البطاريات إلى المصباح. لعرض أشمل لمحتوى الفصل، اقلب الصفحات لملخص الفصل في صفحة ٣٢٧.

بالرغم من أن هذا الفصل يركّز على الكهرباء وشحناتها، إلا أننا سوف نرى في الفصل الحادي عشر أن المغناطيس وأقطابه ذات صلة وثيقة أيضا. في حين أننا سنترك العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية لذلك الفصل، إلا أنك قد تبدأ برؤية التشابهات بين هاتين الظاهرتين اللتين تبدوان أنهما مختلفتان بقراءتك للفصل العاشر.



١٠-١ الكهرباء الساكنة

قد يكون من الصعب رؤية الكهرباء، لكن يمكنك رؤية آثارها بسهولة. كم من المرات وجدت جوارب ملتصقة بقميص عندما تخرجهما من مجففة الملابس الساخنة، أو عانيت من إلقاء قطعة من غلاف بلاستيكي والتي لا تترك يدك ولا تمكث في سلة المهملات؟ إن القوى التي خلف هذه التأثيرات المألوفة هي كهربائية في طبيعتها وتنشأ مما نطلق عليه عادة «الكهرباء الساكنة». لكن الكهرباء الساكنة تقوم بأكثر من مجرد دفع الأشياء، كما قد تكون لاحظت عندما تمدّ يدك لتمسك بمقبض باب أو يد صديق في يوم بارد وجاف. في هذا القسم، سوف نفحص الكهرباء الساكنة والفيزياء التي خلف قواها المثيرة وصدماتها المؤلمة في الغالب.

أسئلة للتفكير:

كيف تنتج مجففة الملابس كهرباء ساكنة ولماذا تتلاصق بعض الملابس بينما أخرى تتنافر؟ لماذا يعرّضك المشي عبر سجادة في يوم بارد وجاف لحدوث صدمة حينما تمد يدك لتمسك بمقبض الباب؟ لماذا تحصل على صدمة واحدة قصيرة فقط من مقبض الباب وليس صدمة طويلة ومستمرة؟ عندما ينتج من لمسك لصديقك صدمة، هل تسبب أحدكما في هذه الصدمة أم أن كليكما مسؤول؟ إذا كان الفرك مطلوباً لإحداث كهرباء ساكنة، فلماذا يُنتج الغلاف البلاستيكي الكثير منها عندما تقوم ببساطة بفتح غلاف قرص مضغوط (سي دي)؟ لماذا يقلل الهواء الرطب والمواد الكيميائية المضادة للكهرباء الساكنة من الكهرباء الساكنة؟

تجارب يمكن القيام بها:

يمكنك أن تدرس الكهرباء الساكنة بفرك بالون بعنف خلال شعرك أو بكنزة صوفية. بالرغم من أن مظهره لن يتغيّر، سيبدأ البالون بجذب أشياء أخرى، وبالخصوص شعرك. ما الذي حدث للبالون؟ ماذا حدث لشعرك؟ لماذا يجذب البالون أيضا أشياء لم يتم فركها؟ حاول أن تتخلص من جاذبية البالون بجعل تيار سميك من الماء يتدفق فوق سطحه. لماذا تعيد هذه العملية البالون لوضعه الطبيعي؟ ما الذي «غسلته» من البالون؟ والآن افرك بالونين متشابهين خلال شعرك وانظر هل يتجاذبا أم يتنافرا. هل النتيجة منطقية؟ أخيرا، اسحب شريطين طويلين من اللصق الشفاف من وعائهما دون فركهما بأي شيء وانظر إذا كانا يتجاذبان أم يتنافران. هل الفرك ضروري لتوليد الكهرباء الساكنة؟

الشحنة الكهربائية والملابس المغسولة للتو

ما لم تكن قد عشت طوال عمرك في مناخ رطب وتجنبت الأقمشة الصناعية، فإنك قد واجهت تأثير الكهرباء الساكنة. إن الأجسام التي تبدو معتادة قد سحبت أو دفعت بعضها البعض بشكل غامض، وأنت قد استقبلت صدمات بينما مددت يدك لمفتاح الإضاءة، أو باب السيارة أو يد صديقك. لكن الكهرباء الساكنة هي أكثر من مجرد إزعاج مثير؛ فهي نافذة بسيطة للعمل الداخلي لكوننا وتستحق نظرة جادة. سوف يأخذ وضع الأسس بعض الوقت، لكن قريبا ستكون قادرا على تفسير معظم تأثيرات الكهرباء الساكنة وحتى التحكم بها إلى حدّ ما.

عُرف وجود الكهرباء الساكنة منذ عدة آلاف من سنين. في حوالي ٦٠٠ قبل الميلاد، لاحظ الفيلسوف اليوناني طاليس من ميليتوس (حوالي 624 – B.C 546) أنه عند فرك الكهرمان بشدة بالفراء، فإنه يجتذب أجساماً خفيفة مثل القش والريش. يُعرف الكهرمان عند اليونان بإلكترون، وهو مادة صمغية تخرج من بقايا شجر بالٍ لها خصائص مشابهة للبلاستيك الحديث. المصطلح «static electricity أو كهرباء ساكنة»، مثل مصطلحات أخرى في هذا الفصل، مشتق من ذلك الجذر اليوناني.

تبدأ الكهرباء الساكنة من الشحنة الكهربائية، وهي خاصية ذاتية للمادة. الشحنة الكهربائية موجودة في العديد من الجسيمات دون الذرية والتي تتركب منها المادة، وتدمج هذه الجسيمات شحناتها في كل شيء تقريبا. لا أحد يعلم لماذا توجد الشحنات؛ إنها مجرد أحد المميزات الأساسية لكوننا وشيء اكتشفه الناس من خلال الملاحظة والتجربة. بما أن الشحنة الكهربائية لها تأثير كبير على الأجسام التي تحتويها، فإننا سنشير في بعض الأحيان لهذه الأجسام كشحنات كهربائية أو ببساطة شحنات.

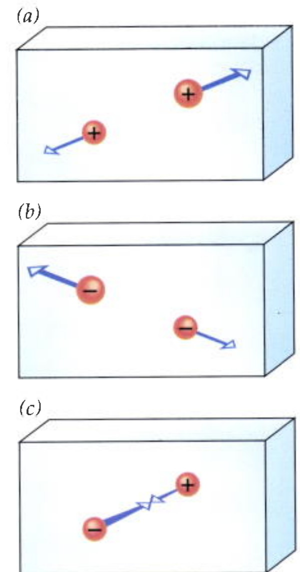
تبذل الشحنات قوى على بعضها البعض، وهذه القوى هي التي تلاحظها مع الكهرباء الساكنة. في المرة القادمة التي تغسل فيها ملابسك، قم بتجارب بملابسك عندما تُخرجها من مجففة الملابس. ستجد أن بعض الملابس المشحونة كهربائيا تجذب بعضها البعض بينما تتنافر أخرى. مما لا شك فيه، هناك نوعان مختلفان من الشحنات. لكن في حين كانت هاتان المجموعتان معروفة منذ عام ١٧٣٣م، عندما تم اكتشافها من قِبل الكيميائي الفرنسي تشارلز فرانسوا دي كيستيرناي دو فاي (١٦٩٨ – ١٧٣٩م)، إلا أن بينجامين فرانكلين هو من أعطى أخيرا للشحنتين أسماءهما الحالية (انظر ٥[١]). سمّى فرانكلين ما يظهر على الزجاج عند فركه بالحرير «شحنة موجبة» وما يظهر على المطاط الصلب عند فركه بالفراء الحيواني «شحنة سالبة.»

تدفع الشحنتان المتشابهتان (كلتاهما موجبة أو كلتاهما سالبة) بعضهما بعيدا عن الأخرى، وتواجه كل منهما قوة تنافر تدفعها مباشرة بعيدا عن الأخرى (شكل ١,١,١٠ أ،ب). تجذب الشحنتان المختلفتان (إحداهما موجبة والأخرى سالبة) بعضهما البعض، وتواجه كل منهما قوة تجاذب تجذبها مباشرة نحو الأخرى (شكل ١,١,١٠ ج). تسمى هذه القوى التي بين الشحنات الكهربائية الساكنة قوى كهروستاتيكية. عندما تجد أن جوربين مغسولين حديثا يدفعان بعضهما البعض، فذلك لأن لهما نفس نوع الشحنة. يعتمد كون تلك الشحنة موجبة أو سالبة على الأقمشة المستخدمة (مزيد حول ذلك لاحقا)، فدعنا نفترض أن مجففة الملابس أعطت كل جورب شحنة سالبة. بما أن الشحنات المتشابهة تتنافر، فإن الجوارب تدفع بعضها البعض. ولكن ماذا يعني أن لمجففة الملابس أن تُعطي كل جورب شحنة سالبة؟

الإجابة على ذلك السؤال لها عدة أجزاء. أولا: مجففة الملابس لم تُنشئ الشحنة السالبة التي أعطتها للجورب. مثل كمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية، والطاقة، فإن الشحنة الكهربائية هي كمية فيزيائية محفوظة – لا يمكن تكوينها أو إتلافها، بل تُنقل فقط. لا بد أن الشحنة السالبة التي أعطتها مجففة الملابس للجورب قد أتت من شيء آخر، ربما قميص.

ثانيا: الشحنة الموجبة والشحنة السالبة هي ليست في الحقيقة كيانين منفصلين – هي فقط مقادير موجبة

٥[١] من أن أكثر ما يُذكر به هو نشاطاته السياسية، إلا أن رجل الدولة والفيلسوف الأمريكي بنجامين فرانكلين (١٧٠٦ – ١٧٩٠م) كان أيضا عالما بارزا في المستعمرات الأمريكية أثناء منتصف القرن الثامن عشر. ساهمت تجاربه في أمريكا وأوروبا بشكل كبير في فهم الكهرباء والشحنات الكهربائية. بالإضافة لتوضيحه أن البرق هو شكل من أشكال التفريغ الكهربائي، اخترع فرانكلين عدداً من الأجهزة المفيدة، منها موقد فرانكلين، وقضبان البرق، والعدسات ثنائية البؤرة.



شكل ١,١,١٠: (أ) تواجه شحنتان موجبتان قوتين متساويتين لكن متعاكستين في الاتجاه ومبتعدتان عن بعضهما البعض. (ب) يحدث نفس التأثير لشحنتين سالبتين. (ج) تواجه شحنتان متعاكستان قوتين متساويتين لكن متعاكستين متجهتين تماما نحو بعضهما البعض.

وسالبة لنفس الكمية الفيزيائية: الشحنة الكهربائية. الشحنات الموجبة لها مقادير موجبة من الشحنة الكهربائية، بينما الشحنات السالبة لها مقادير سالبة. مثل معظم الكميات الفيزيائية، نحن نقيس الشحنة بالوحدات القياسية. وحدة الشحنة الكهربائية في النظام العالمي SI هي الكولوم (اختصارا C). إن الأجسام الصغيرة نادراً ما يكون لها كولوم كامل من الشحنة، وشحنة جوربك هي فقط حوالي 0.0000001C-.

ثالثا، تشير شحنة الجورب السالبة للجورب ككل، وليس أجزائه الداخلية. مثل جميع المواد الاعتيادية، يحتوي الجورب على عدد هائل من الجسيمات المشحونة بشحنات موجبة وسالبة. تحتوي كل من ذرات الجورب على لُب مركزي كثيف أو نواة، تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات غير مشحونة، محاطة بسحابة منتشرة من إلكترونات سالبة الشحنة. القوى الكهروستاتيكية بين هذه الجسيمات الصغيرة المشحونة لا تُمسك الذرات سوية فحسب، بل الجورب بأكمله أيضاً. ولكن بإعطاء الجورب شحنة سالبة، عملت مجففة الملابس على أن تكون محصلة الشحنة الكهربائية للجورب - أي مجموع كل مقادير شحناتها الموجبة والسالبة - هي سالبة. بمحصلة شحنة سالبة، يتصرف الجورب مثل جسم بسيط سالب الشحنة.

أخيرا، أصبح الجورب مشحوناً بشحنة سالبة عندما احتوى على إلكترونات أكثر من البروتونات. ما تتضمنه هذه العبارة البسيطة هو الكثير من الدراسة العلمية الجادة. للبدء، أوضحت التجارب أن الشحنة الكهربائية مكممة: تظهر الشحنة دائما كمضاعفات عدد صحيح من وحدة الشحنة الكهربائية الأولية. هذه الوحدة الأولية للشحنة صغيرة جدا، فقط حوالي $1.6\ C \times 10^{-19}$، وهي مقدار الشحنة الموجودة في معظم الجسيمات دون الذرية. للإلكترون 1- وحدة شحنة أولية، بينما البروتون له 1+ وحدة شحنة أولية. بما أن الجسيمات دون الذرية الوحيدة المشحونة في المادة الطبيعية هي الإلكترونات والبروتونات، فإن الجورب يصبح سالب الشحنة بمجرد امتلاك إلكترونات أكثر من البروتونات.

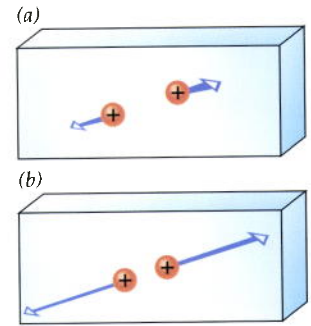
عودة للسؤال الأصلي، نحن نعلم الآن ماذا عملت مجففة الملابس لكي تُعطي الجورب شحنة سالبة. بفرض أن الجورب بدأ بتعادل كهربائي - أي كان له محصلة شحنة صفرية - فإن مجففة الملابس لا بُدّ وأن أضافت إلكترونات للجورب أو انتزعت بروتونات من الجورب أو الاثنين معاً. هذه الانتقالات للشحنات أخلّت بتوازن شحنات الجورب وأعطته محصلة شحنة سالبة. بقاءً على اتفاقنا بخصوص الكميات المحفوظة، فإن جميع الشحنات التي لا يوضع أمامها إشارة في هذا الكتاب تعني مقداراً موجباً. على سبيل المثال، إذا أعطت مجففة الملابس شحنة لمعطف، فإننا نعني أنها أعطت مقداراً موجباً من الشحنة لذلك المعطف. نحن نتبع نفس الاتفاق فيما يخص المال: عندما تقول أنك أعطيت مالاً لجمعية خيرية، فإننا نفترض أنك أعطيت مقداراً موجباً.

أخيرا، كان مبدأ تسمية فرانكلين للشحنات رائعا في المفهوم لكن رديئاً في التنفيذ. بينما تحوّل حسابات محصلة الشحنات إلى عمليات جمع بسيطة، إلا أنه تطلّب من فرانكلين اختيار أي نوع من الشحنات يسمى «موجباً» وأيها يسمى «سالباً». من سوء الحظ، هذا الخيار والذي يبدو عشوائيا جعل الإلكترونات، والتي هي الوحدة الأساسية للتيار الكهربائي في الأسلاك، ذات شحنة سالبة. فكان على العلماء والمهندسين أن يتعاملوا مع مقادير سالبة من الشحنة المتدفقة خلال الأسلاك منذ ذلك الوقت. تخيل صعوبة القيام بتجارة باستخدام عملة نقدية في فئات سالبة فقط!

تحقق من فهمك # ١: مسؤول عن فتح الهدايا (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

الهدية التي ستقوم بفك غلافها متعادلة كهربائيا. تقوم بتمزيق الغلاف الشفاف وتجد أن له شحنة سالبة كبيرة. ما هي شحنة الهدية ذاتها، إن كان لها شحنة؟

قانون كولوم والالتصاق الساكن



شكل ٢،١،١٠: تزداد القوى الكهروستاتيكية بين شحنتين بشكل كبير عندما تقتربان من بعضهما البعض. حينما تتناقص المسافة بين شحنتين موجبتين بمعدل ٢ بين (أ) و(ب)، فإن القوى التي تواجهها هاتان الشحنتان تزيد بمعدل ٤.

بالرغم من أن جوربك وقميصك يتجاذبان بقوة عندما يكونان على بعد مجرد بوصات عن بعضهما البعض، لكن يمكنك أن تلبس قميصك وتذهب إلى السينما دون خوف من هجوم جوربك من أقصى المدينة عليك. من الواضح أن القوى بين الشحنات تضعف مع زيادة المسافة.

قبل أكثر من قرنين، درس الفيزيائي الفرنسي تشارلز أوجستين دي كولوم القوى الكهروستاتيكية تجريبيا وتوصل إلى أن القوى بين شحنتين كهربائيتين تتناسب عكسيا مع مربع المسافة التي تفصل بينهما (شكل ٢،١،١٠). على سبيل المثال، مضاعفة المسافة الفاصلة بين قميصك وجوربك تقلل من تجاذبهما بأربعة أضعاف، وهذا يُفسّر سهرتك الهادئة في السينما. (انظر ٢٥).

أظهرت تجارب كولوم أيضا أن القوى بين الشحنات الكهربائية تتناسب مع مقدار كل شحنة. هذا يعني أن مضاعفة الشحنة على أي من قميصك أو جوربك تضاعف القوة التي يبذلها كل لباس على الآخر. أخيرا، تغير إشارة أي من الشحنات يقلب قوى التجاذب إلى قوى تنافر والعكس وبالعكس. إذا كان كلا اللباسين إما موجبي الشحنة أو سالبي الشحنة، فإنهما سيتنافران بدلا من أن يتجاذبا.

يمكن أن تتحد هذه الأفكار لوصف القوى العاملة على شحنتين وأن تُكتب كمعادلة لفظية: (١،١،١٠)

$$\text{القوة} = \frac{\text{ثابت كولوم} \times \text{شحنة}_1 \times \text{شحنة}_2}{(\text{المسافة بين الشحنات})^2}$$

ورمزيا:

$$F = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

وفي لغة الحياة اليومية: عندما تقترب سحابتان لهما شحنتان متعاكستان، توقع حدوث برق.

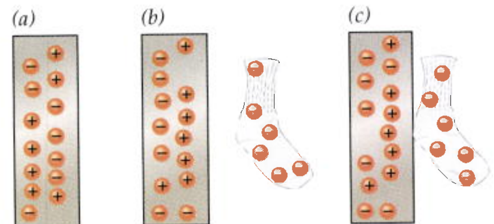
تتجه القوة على الشحنة$_1$ نحو أو بعيدا عن الشحنة$_2$، والقوة على الشحنة$_2$ تتجه نحو أو بعيدا عن الشحنة$_1$.

تسمى هذه العلاقة قانون كولوم، نسبة لمكتشفها. ثابت كولوم هو حوالي $8.988\ N{\cdot}m^2/C^2 \times 10^9$ وهو أحد الثوابت الفيزيائية الموجودة في الطبيعة. بالتوافق مع قانون نيوتن الثالث، القوة المبذولة على شحنة$_1$ من قبل شحنة$_2$ تساوي في المقدار وتعاكس في الاتجاه القوة المبذولة على شحنة$_2$ من قبل شحنة$_1$.

قانون كولوم

مقادير القوى الكهروستاتيكية بين جسمين تساوي ثابت كولوم مضروبا في حاصل ضرب شحنتيهما الكهربائيتين مقسومة على مربع المسافة التي تفصل بينهما. إذا كانت الشحنتان متشابهتين، فالقوى تنافرية. إذا كانت الشحنتان متعاكستين، فالقوى تجاذبية.

[٢٥] في عام ١٧٨١م، بعد عمله كمهندس عسكري في جزر الهند الغربية، رجع الفيزيائي الفرنسي تشارلز أوجستين دي كولوم (١٧٣٦-١٨٠٦م) إلى بلده الأم باريس في حالة صحية سيئة. هناك قام ببحوث علمية حول طبيعة القوى بين الشحنات الكهربائية ونشر سلسلة من ذكرياته حول الموضوع بين العامين ١٧٨٥ و١٧٨٩م. انتهى بحثه في عام ١٧٨٩م عندما أُجبر على مغادرة باريس بسبب الثورة الفرنسية.



شكل ٣،١،١٠: (أ) يحتوي جدار متعادل على عدد لا نهائي من الشحنات الموجبة والسالبة. (ب) حينما يقترب جورب مشحون بشحنة سالبة من الجدار، تتجه الشحنات الموجبة نحوه والشحنات السالبة بعيدا عنه. (ج) يستمر الجدار المستقطب بجذب الجورب ويبقيه في موضعه.

بالإضافة إلى حمايتك من جوارب بعيدة مشحونة، فإن هذه العلاقة بين القوى الكهروستاتيكية والمسافة توضح ميزة أخرى مثيرة للغسيل الاستاتيكي: يمكن للملابس المشحونة أن تتعلق بأجسام متعادلة كهربائياً! على سبيل المثال، يمكن لجورب مشحون بشحنة سالبة أن يلتصق بجدار متعادل كهربائيا.

مصدر هذا التجاذب هو إعادة ترتيب لطيفة للشحنات داخل الجدار. بالرغم من أن للجدار محصلة شحنة صفرية، إلا أنه مازال يحتوي على كل من جسيمات مشحونة بشحنات موجبة وسالبة. عندما يكون الجورب المشحون بشحنة سالبة قريبا من الجدار، فإنه يجذب شحنات الجدار الموجبة أقرب إليه قليلاً ويدفع شحنات الجدار السالبة أبعد عنه قليلاً (شكل ٣،١،١٠). بالرغم من أن كل شحنة على حدة تُزاح فقط مسافة قليلة جدا، إلا أن الجدار يحتوي على العديد من الشحنات والتي سوية تُعطي نتيجة هائلة. ينشئ الجدار استقطابا كهربائيا – أي يظل متعادلاً كهربائيا إجمالا، لكن بوجود منطقة موجبة الشحنة أقرب ما يمكن من الجورب ومنطقة سالبة الشحنة أبعد ما يمكن عن الجورب.

تجذب منطقة الجدار الموجبة الجورب بينما المنطقة السالبة تنفر الجورب. بالرغم من أنك قد تتوقع أن تتوازن تلك القوتين المتعاكستين، إلا أن قانون كولوم يقول عدا ذلك. بما أن القوى الكهروستاتيكية تضعف مع المسافة، فإن الجورب يتجاذب بقوة أكبر للمنطقة الموجبة القريبة أكثر من تنافره عن المنطقة السالبة الأكثر بُعدا. إجمالا، هناك محصلة تجاذب كهروستاتيكي بين الجورب المشحون والجدار المستقطب، لذا يلتصق الجورب بالجدار!

تحقق من فهمك # ٢: إعادة تصنيع الأغلفة (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

بعد فتح هديتك، تحاول أن ترمي غلافها المشحون بشحنة سالبة. ولكن الغلاف يستمر بالعودة إلى يدك. ما الذي يجذبه ليدك المتعادلة كهربائيا؟

دقق في أرقامك #١: الانتقال (للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

لديك كرتان مشحونتان بشحنة موجبة، وكل منهما تواجه قوة مقدارها 1N بعيدا عن الأخرى. إذا قلصت المسافة بين الكرتين إلى النصف، فما هي القوة التي ستبذلها كل منهما على الأخرى؟

نقل الشحنات: احتكاك الانزلاق أم تلامس؟

في حين من الواضح أن مجففة الملابس تنقل الشحنات بين الملابس، فلماذا تتحرك تلك الشحنات وما الذي يُحدد أي من هذه الملابس يكتسب شحنة وأيها يفقدها؟
قد تفترض أن احتكاك الانزلاق هو المسؤول عن النقل – أن مجففة الملابس تفرك الملابس ببعضها وبطريقة ما تمسح شحنات من أحد الملابس وتعطيها إلى الآخر. فإن الاحتكاك يبدو وكأنه يساعدك في شحن بالون حينما تفركها خلال شعرك أو بكنزة صوفية. ولكن كن على حذر – هناك حالات أخرى لنقل الشحنات والتي لا تتضمن فركاً إطلاقا. على سبيل المثال، يمكن للغلاف البلاستيكي الذي تزيله من تغليف المتجر أن يكتسب شحنة بغض النظر عن حذرك من فركه بمحتوياته. ويمكن للسيارة الأثرية أن تبني شحنة كافية لإعطائك صدمة سيئة حتى وإن لم تنزلق عجلاتها المطاطية الواهنة على الطريق المرصوف بتاتاً.

انتقال الشحنات هو لدرجة أقل نتيجة الفرك مقارنة بكونه نتيجة تلامس بين سطحين مختلفين. عندما تتلامس مادتان مختلفتان ببعضهما البعض، فإن بضعة إلكترونات تنزاح طبيعيا من سطح لآخر. ينتج هذا الانتقال من الفروق الكيميائية بين السطحين المتلامسين والتغير المرتبط بالطاقة الكامنة للإلكترون عندما ينزاح. في الحقيقة، بعض الأسطح «أكثر جوعا» للإلكترونات من أسطح أخرى، وكلما تلامس سطحان مختلفان، فإن السطح الأكثر جوعا يسرق بعض الإلكترونات من رفيقه الأقل جوعا.

إن الفيزياء التي وراء هذه السرقة لها ارتباط بالطاقة الكيميائية الكامنة - الطاقة المختزنة في القوى الكيميائية التي تربط محتويات المادة من الذرات والإلكترونات معاً. للإمساك بإلكتروناته، يقلل السطح من طاقاتها الكيميائية لأقل من صفر، بمعنى أنه سيتطلب طاقة إضافية لتحرير هذه الإلكترونات من السطح. ولكن بعض الأسطح تقلل من الطاقة الكيميائية الكامنة للإلكترونات أكثر من غيرها وبالتالي تربط إلكتروناتها بإحكام أكبر. إذا استطاع إلكترون على سطح ما أن يقلل من طاقته الكيميائية الكامنة بالإزاحة للسطح الآخر، فإنه سوف يتسارع نـحو ذلك السطح «الأكثر جوعا» وفي نهاية المطاف يلتصق هناك. يمكنك أن تتصور الإلكترون كأنه «يتدحرج لأسفل منحدر» من «وادٍ» كيميائي من أحد الأسطح لوادٍ أعمق في السطح الآخر.

هذا الانتقال للإلكترونات محدود ذاتيا. حينما تتراكم الإلكترونات على السطح ذي الطاقة الأقل، فإنها تبدأ بالتنافر مع أي إلكترون يحاول أن يتبعها وتتوقف عملية الانتقال بعد برهة من الزمن. تتوقف العملية كلية عندما تصل الإلكترونات إلى الاتزان - أي عندما تتوازن تماما القوة الكيميائية إلى الأمام التي يواجهها الإلكترون مع القوة الكهروستاتيكية للخلف. لن يعاود الانتقال إلا إذا أتيت بمناطق سطحية جديدة غير مشحونة لتتلامس.

من هنا يدخل الفرك في الصورة. يتضمن الفرك الكثير من التلامس السطحي وفُرصاً لا نهائية تقريباً لانتقال الشحنات بين تلك الأسطح. بينما تتقلب الملابس في مجففة الملابس، ملامسة بعضها البعض وغالبا فاركة، فإن بعض الأقمشة تسرق إلكترونات وتصبح مشحونة سلبيا بينما أقمشة أخرى تفقد إلكترونات وتصبح مشحونة إيجابيا.

ومع هذا، يجب أن تُدرك أن تفاصيل الشحن بالتلامس معقدة. بالنسبة للمبتدئين، الأسطح التي في الواقع تلامس بعضها البعض ليست صافية كيميائيا وليست خالية من الشوائب الدقيقة. في حين من الصواب بالعموم أن أي قماش يربط الإلكترونات بإحكام أكبر هو الأكثر احتمالية أن يُنشئ محصلة قوة سالبة، إلا أنه يمكن لتلوث وعيوب الأسطح أن تغيّر النتيجة النهائية بشكل جذري. حتى اختيارك لمسحوق الغسيل قد يؤثر على كيمياء سطح القماش وبالتالي كيفية شحنه. علاوة على ذلك، تلتصق جزيئات الماء بمعظم الأسطح وتؤثر في عملية الشحن بالتلامس. أخيرا، في حين قد ركّزنا على تبادل الإلكترونات، فإنه أيضا من المحتمل لبعض الأسطح أن تُبادل أيونات - أي، ذرات أو جزيئات أو جسيمات صغيرة مشحونة كهربائيا - إضافة للإلكترونات وتكتسب محصلة شحنة نتيجة لذلك.

تحقق من فهمك # ٣: شريط لاصق (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

عندما تزيل قطعة من شريط لاصق من على نافذة زجاجية، تجد أن الشريط يتجاذب نـحو البقعة التي خلّفها. كيف اكتسب الشريط والزجاج شحنات كهربائية؟

فصل ملابسك: إنتاج فرق جهد عالٍ

تتوقف مجففة الملابس وتُخرج منها قميصك المفضل. هناك العديد من الجوارب ملتصقة به، فتبدأ بإزالتها. بينما تفصل الملابس، فإنها تُصدر صوت طقطقة وتُحدث شرراً. من الواضح أن تجاذبها هو نتيجة لشحنات متعاكسة، لكن لماذا فصلها يجعلها تُصدر شراراً؟

للإجابة على ذلك السؤال، دعنا نُفكّر بشأن الطاقة بينما تسحب بثبات الجورب المشحون بشحنة سالبة بعيدا عن القميص المشحون بشحنة موجبة. بما أن الجورب سيتسارع نـحو القميص إذا تركته، فإنك بالتأكيد تؤثر بقوة على الجورب. ولأن تلك القوة وحركة الجورب هما في نفس الاتجاه، فأنت أيضا تبذل شغلا على الجورب. أنت تنقل طاقة له.

تلك الطاقة مختزنة في القوى الكهروستاتيكية - يُجمّع القميص والجورب طاقة كهروستاتيكية كامنة. تتواجد الطاقة الكامنة الكهروستاتيكية كلما يتم سحب شحنات مختلفة بعيدا عن بعضها أو دفع شحنات متشابهة نـحو بعضها. والآن مع كون الجورب المشحون بشحنة سالبة بعيدا عن القميص المشحون بشحنة موجبة، فإن كلا من التجاذب والتنافر يساهمان في الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة: تنفصل الشحنات المتعاكسة عن بعضها في اللباسين وتتجمع الشحنات المتشابهة سوية في كلا اللباسين.

إن الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة الكلية في القميص والجورب هي الشغل الذي بذلته لفصلهما. لكن تلك الطاقة الكامنة ليست مقسومة بالتساوي بين الشحنات الفردية على هذه الملابس. اعتمادا على مواقعها، فإن بعض الشحنات لها طاقة كهروستاتيكية كامنة أكثر من الأخريات وبالتالي هي أكثر أهمية عندما يتعلق الأمر بالشرارات. اعترافا بهذه الاختلافات، نحتاج إلى طريقة مناسبة لتمييز الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة المتوفرة لشحنة في موقع معيّن. المقياس الذي نبحث عنه هو الفولطية (فرق الجهد) – الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة المتوفرة لكل وحدة شحنة كهربائية عند موضع معطى.

الفولطية هي كمية يصعب فهمها لأنك لا تستطيع أن ترى الشحنة أو تشعر بطاقتها المختزنة. لمساعدتك في فهم الفولطية سوف نستخدم تشبيهاً بسيطاً. في هذا التشبيه، دور الشحنة سيلعبه الماء ودور الفولطية سيلعبه الارتفاع. حيث الفولطية مرتفعة، تخيل الماء مرتفعاً فوقك. حيث الفولطية منخفضة، تصور الماء عند ارتفاع أقل. وكما أن الماء يميل للتدفق من الارتفاع الأعلى إلى الارتفاع الأقل، كذلك الشحنة تميل للتدفق من فولطية مرتفعة إلى فولطية منخفضة.

يعمل هذا التشبيه بشكل جيد لأن كلا من الفولطية والارتفاع يقيسان الطاقة لوحدة شيء ما. الفولطية هي الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة لكل وحدة شحنة والارتفاع يمكن أن يُفسّر كطاقة جذب كامنة لكل وحدة وزن. بالرغم من أن التفكير بالارتفاع بهذه الطريقة قد يبدو غريبا، إلا أن كلاً من الماء عند الارتفاع العالي والشحنة عند الفولطية المرتفعة مليء بالطاقة لكل وحدة ومن المحتمل أن يتسبب في إحداث مشاكل!

بما أن وحدة الطاقة في النظام SI هي الجول ووحدة الشحنة الكهربائية في النظام SI هي الكولوم، فإن وحدة الفولطية في النظام SI هي الجول-لكل-كولوم، والمعروف عامة بالفولت (اختصارا V). حيث الفولطية موجبة، فإنه يمكن للشحنة (الموجبة) أن تُطلق طاقة كهروستاتيكية كامنة بالهروب إلى مكان بعيد متعادل كهربائيا. الشحنة عند الفولطية الموجبة تشابه الماء على هضبة، والذي يمكنه أن يُطلق طاقة جذب كامنة بالتدفق للأسفل إلى مكان بعيد مستوٍ. حيث الفولطية سالبة، تحتاج الشحنة إلى طاقة للهروب إلى مكان بعيد متعادل كهربائيا. الشحنة عند الفولطية السالبة تُشابه الماء في وادٍ، والذي يحتاج إلى طاقة لكي يتدفق للأعلى إلى مكان بعيد مستوٍ.

كما ترى، هذا التشابه بين الفولطية والارتفاع هو نعمة. لكن في حين تجد هذا التشبيه مفيدا الآن وخلال هذا الكتاب، الرجاء أن تتذكّر أن الارتفاعات والانخفاضات في الارتفاع التي تستخدمها لتصوّر الفولطية لا تحدث إلا في عين عقلك وليس في العالم الحقيقي. ليس بالضرورة أن تتحرك ملابسك للأعلى وللأسفل بينما تتغير فولطيتها!

عودة إلى تلك الملابس، ستجد أن كل نقطة على القميص أو الجورب لها فولطيتها الخاصة. يمكنك تحديد تلك الفولطية بأخذ مقدار صغير جدا من الشحنة (الموجبة) من تلك النقطة – «شحنة اختبار» – وتحريكها إلى موضع بعيد متعادل كهربائيا. فولطية النقطة هي ببساطة الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي تطلقها أثناء تلك الرحلة مقسوما على كمية شحنتها. إذا كانت النقطة التي تريد فحصها هي على القميص المشحون بشحنة موجبة، فستحصل على فولطية موجبة مرتفعة – من المحتمل عدة آلاف فولت. إذا كانت على الجورب المشحون بشحنة سالبة، فستحصل على فولطية سالبة بنفس المقدار. سواء موجبة أو سالبة، هذه الفولطيات المرتفعة تميل لإحداث شرارات.

سوف ننظر لفيزياء الشرارات والتفريغ الكهربائي قريبا، لكن يمكنك من الآن رؤية لماذا تصدر الملابس المشحونة بشحنات مختلفة شراراً عندما تفصلها عن بعض: هذا هو وقت تكوّن الفولطيات المرتفعة. طالما أن جوربك يلتصق بإحكام بقميصك، لا يتوفر الكثير من الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة. لكن بمجرد أن تبدأ بفصلهما، انتبه!

تحقق من فهمك # ٤: فولطية الارتفاع العالي (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

في حين يمكن لأي سحابة أن تحتوي على شحنات متعاكسة، إلا أن التيارات الهوائية العنيفة الصاعدة داخل السحابة القزعية والتي تُرى قبل العاصفة هي فقط القادرة على فصل تلك الشحنات وإنتاج البرق. لماذا يؤدي مثل هذا الفصل للبرق؟

تجميع شحنات ساكنة هائلة

لقد رأينا أن ملامسة مادتين مختلفتين تسبب انتقال صغير للشحنات من أحد الأسطح للآخر وأن فصل تلك الأسطح المشحونة بشحنات مختلفة يُنتج فولطيات عالية وربما شرارات. لكن صوت طقطقة وفرقعة الملابس الضعيف في سلة غسيلك لا يُقارن مع صواعق البرق الصغيرة التي يمكن أن تنتجها بعد سيرك عبر السجاد في يوم بارد جاف، أو الخروج من سيارة أثرية، أو اللعب بمولد شحنات ساكنة. للحصول على شرارة كبيرة حقا، ستحتاج لفصل الكثير من الشحنات وهذا في العادة يتطلب جهداً متكرراً.

إن المشي عبر السجاد هو مثال لتلك العملية التكرارية. كلما يهبط نعل حذائك المطاطي على سجاد من الاكريليك، فإن بعض الشحنات (الموجبة) تنزاح من السجاد إلى حذائك. على الرغم من أن الانتقال قصير ومحدود ذاتيا، إلا أنك الآن لديك شحنة صغيرة إضافية على حذائك. عندما ترفع ذلك الحذاء من على السجاد، فأنت تبذل شغلا على شحنته الجديدة وترتفع فولطية حذائك لكمية عالية موجبة. تميل شحنات الفولطية المرتفعة للتسرب من مكان لآخر وتنتشر شحنات الحذاء بسرعة لباقي جسمك. خلال الوقت الذي تهبط فيه قدمك مرة أخرى على بقعة جديدة من السجاد، فإن الحذاء يكون قد تخلص من معظم شحنته ومستعداً لبدء العملية مرة أخرى من جديد.

كلما تهبط قدمك على السجاد، فإنها تلتقط بعض الشحنات. وكلما ترتفع عن السجاد فإن تلك الشحنات تنتشر على جسمك. في الوقت الذي تصل فيه أخيرا لمقبض الباب، تكون قد تغطيت بالشحنات ولديك فولطية موجبة هائلة. بينما تقترب يدك من مقبض الباب، فإنها تبدأ بالتأثير على شحنات مقبض الباب - فتجذب شحنات مقبض الباب السالبة لتصبح أكثر قربا وتدفع الشحنات الموجبة لتصبح أكثر بعدا. أنت استقطبت مقبض الباب.

كما رأينا عندما فصلنا جوربك المغسول من قميصك، يمكن للأجسام المشحونة بشحنات متعاكسة والقريبة من بعضها البعض بغير تلامس أن يكون لها كل من طاقات كهروستاتيكية كامنة كبيرة وقوى كهروستاتيكية قوية. هذا هو الوضع هنا. كلما اقتربت يدك من مقبض الباب، أصبحت القوى الكهروستاتيكية أشد قوة حتى في النهاية لا يستطيع الهواء ذاته تحمّل القوى وتتشكل شرارة. في لحظة، تتحرر معظم طاقتك الكهروستاتيكية الكامنة التي جمعتها على هيئة ضوء، وحرارة، وصوت. وهذا لا يتضمن الصيحات.

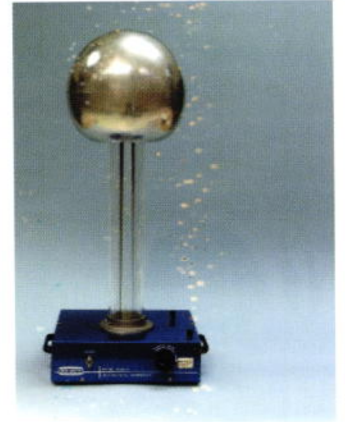
لكن مع جودة المشي في تكوين شحنة، فإن السيارة الأثرية هي أكثر جودة. فعجلاتها المطاطية الواهنة تجمع شحنات سالبة عندما تلامس الأرض المرصوفة وتكوّن فولطية سالبة كبيرة عندما تدور بعيدا عنها. تنتقل هذه الشحنة لجسم السيارة بحيث أنه بعد بضع ثوانٍ من السير، تجمّع السيارة شحنة كافية لإعطاء أي شخص يلمسها صدمة موجعة. نتيجة لذلك كان جمع رسوم الطريق عملا خطرا! من حسن الحظ، تُشكّل العجلات الحديثة بحيث تسمح لهذه الشحنة السالبة بالعودة بسلام للأرض المرصوفة، بحيث من النادر أن تجمع السيارات الكثير من الشحنات. بدلا من ذلك، يأتي معظم الصدمات المرتبطة بالسيارات الآن من التزحلق من على المقعد أثناء دخولك أو خروجك من السيارة.

في حين تحاول السيارات أن تتجنب الشحن الاستاتيكي، هناك آلات تُجمّع شحنات منفصلة عمداً لإنتاج فولطيات عالية جداً. أشهر هذه الآلات الكهربائية الساكنة هو مولد الفاندوغراف (شكل ٤,١,١٠). يستخدم المولد حزاماً مطاطياً لرفع الشحنات الموجبة أو السالبة إلى كرة معدنية إلى أن يصل مقدار فولطية الكرة لمئات الآلاف أو حتى الملايين من الفولتات.

يستخدم الفاندوغراف المدرسي المعتاد محركاً دافعاً للحزام المطاطي لحمل الشحنات السالبة من قاعدته لقمة كرته المعدنية. ما أن تدخل شحنات الحزام السالبة إلى داخل الكرة، تبدأ بالتدفق خارجيا على سطح الكرة، حيث يمكنها أن تكون أبعد ما يمكن عن بعضها البعض. تظل الشحنات هناك إلى أن يحررها شيء ما.

إن كرة مولد الفاندوغراف المعلقة في أعلى عمود عازل طويل يمكنها أن تُجمّع شحنة سالبة هائلة. يمكنك أن

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٤,١,١٠: يمكن إنتاج الكهرباء الساكنة بعمليات ميكانيكية. في مولد فاندوغراف، ينقل حزام مطاطي متحرك الشحنات السالبة من القاعدة إلى كرة معدنية لامعة. تكوّن هذه الشحنة السالبة شرارات هائلة أثناء عودتها خلال الهواء باتجاه الشحنة الموجبة التي خلّفتها.

تسمع معاناة المحرك حينما يدفع شحنات الحزام السالبة للأعلى إلى الكرة، وهي دلالة على مقدار الفولطية السالبة التي تُنشئها الكرة. في نهاية الأمر تحرر الكرة شحنتها السالبة عن طريق شرارة ضخمة.
لكن حتى بدون شرارات، يُعد الفاندوغراف شيئاً مثيراً. إذا عزلت نفسك من الأرض ولمست الكرة المعدنية بينما تُجمّع الشحنات السالبة، فإن بعض هذه الشحنات السالبة ستنتشر عليك أيضا. إذا كان شعرك طويلا ومرناً، ويسمح للشحنات السالبة أن توزّع نفسها على طوله، فإن شعرك قد يقف ويرتفع بواسطة التنافرات الرهيبة بين تلك الشحنات المتشابهة.

تحقق من فهمك # ٥: أوقف المطابع! (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

يتحرك الورق في بعض المطابع الصحفية خلال أسطوانات بسرعة نصف كيلومتر لكل دقيقة. إذا لم تكن هناك عناية، فإن كميات خطرة من الشحنات الساكنة يمكنها أن تتجمع على بعض أجزاء المطبعة. كيف يساهم الورق المتحرك في عملية الشحن هذه؟

التحكم بالكهرباء الساكنة: مليّنات ومطريات الأقمشة

الآن وقد رأينا ما هي الكهرباء الساكنة وكيف تنتج، نحن مستعدون لرؤية كيف نذللها. إن الالتصاق الاستاتيكي، والشعر المتطاير والمصافحة المكهربة ليست بالشيء الممتع. الحل الأساسي للشحنة الساكنة هي التحرك: إذا استطاعت الشحنات أن تتحرك بحرية، فإنها ستلغي الكهرباء الساكنة بذاتها. الشحنات المتعاكسة تتجاذب، فأي شحنات موجبة وسالبة منفصلة عن بعضها ستتحد بمجرد أن يُسمح لها بالتحرك.

إن المواد مثل المعادن والتي تسمح بحرية حركة الشحنة تُسمى الموصلات الكهربائية. أما المواد مثل البلاستيك، والشعر، والمطاط والتي تمنع حرية حركة الشحنة تُسمى العوازل الكهربائية. بما أن حركة الشحنة تُلغي الكهرباء الساكنة، فإن مشاكلنا مع الكهرباء الساكنة تنبع في الغالب من العوازل. إذا ارتديت ملابس معدنية، فلن يكون لديك مشاكل استاتيكية في غسيلك.
أسهل طريقة لتقليل الكهرباء الساكنة هي تحويل العوازل إلى موصلات. حتى الموصلات الضعيفة، والتي بالكاد تسمح للشحنات بالتحرك، ستتخلص تدريجيا من أي تجمعات من الشحنات المنفصلة. هذا أحد الأهداف الرئيسية لملينات الأقمشة والأغشية الورقية الملينة التي تستخدم في مجففة الملابس ومطريات الشعر. جميعها تحوّل المواد العازلة - الأقمشة والشعر - إلى موصلات كهربائية ضعيفة. النتيجة هي اختفاء الكهرباء الساكنة تقريبا وجميع أشكالها المزعجة.

كيفية عمل هذه المواد الثلاثة هي حكاية مثيرة. جميعها تستخدم تقريبا نفس المادة الكيميائية: جزيء منظف ذو شحنة موجبة. الجزيء المنظف هو جزيء طويل مشحون كهربائيا في أحد طرفيه ومتعادل كهربائيا عند الطرف الآخر. يلتصق طرفه المشحون كهروستاتيكيا بالشحنات المعاكسة و«يستوطن» كيميائيا في الماء. طرفه المتعادل كهربائيا شبيه بالزيت، وزلق، و«يستوطن» في الزيوت والشحوم. هذه المواطنة الثنائية هي التي تجعل المنظفات ممتازة في التنظيف.

لكن في حين قد يبدو أن الجزيئات المنظفة المشحونة بشحنة سالبة والمشحونة بشحنة موجبة ستنظف بنفس الكفاءة، إلا أن ذلك ليس صحيحاً. بما أنه يجب على المنظفات أن لا تلتصق بالمواد التي تنظفها، فإنه من المهم أن لا تكون للمادتين شحنات متعاكسة. تصبح الأقمشة والشعر في العموم مشحونة بشحنة سالبة عندما تبتل - مثال آخر على الإزاحة في الشحنة عندما تتلامس مادتان مختلفتان - لذا فإن الجزيئات المنظفة المشحونة بشحنة سالبة تنظف بشكل أفضل من المشحونة بشحنة موجبة.

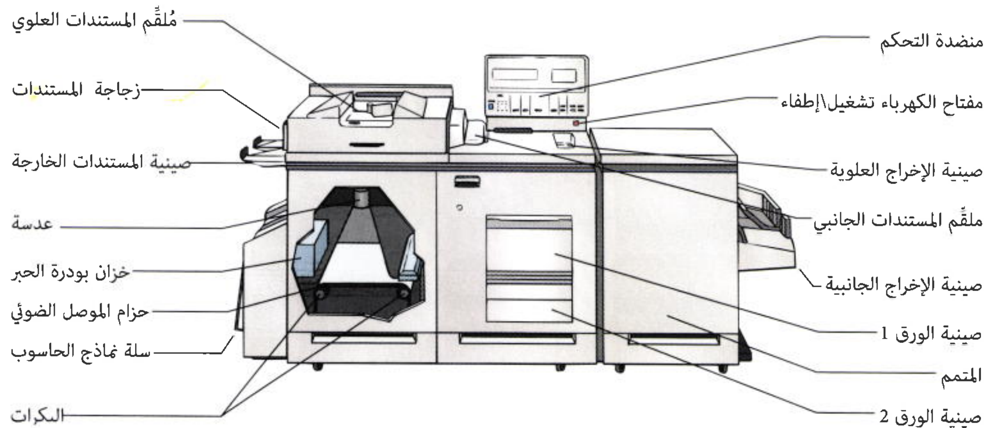
المنظفات المشحونة بشحنة موجبة ما تزال مفيدة، بالرغم من أنك يجب أن لا تضعها إلا بعد تنظيفك ملابسك وشعرك. بسبب أنها تلتصق بشكل جيد بالأنسجة المبللة، فإن هذه الجزيئات المنظفة الزلقة ستظل في مكانها بعد انتهاء الغسيل بفترة طويلة من الزمن وتُعطي الأقمشة والشعر ملمساً ناعماً حريرياً. وستسمح لتلك المواد بتوصيل الكهرباء، ولو بشكل ضعيف، بحيث تُلغي الكهرباء الساكنة تقريباً!

هذه التوصيلية سببها في الأساس ميل المواد لجذب الرطوبة. الماء هو موصل طفيف للكهرباء، والأسطح الرطبة تسمح للشحنات بالتحرك فيها. ولهذا فإن الهواء الرطب يقلل الكهرباء الساكنة. بجعل الأقمشة والشعر رطبة إلى حد بعيد تقريباً، فإن المنظفات الموجبة الشحنة تسمح للشحنات المنفصلة بالعودة لبعضها، وتُنهي مشاكل الشعر الاستاتيكي والتصاق ملابس الغسيل. لهذا تكون هي المكوّنات الرئيسية في ملينات الأقمشة، والأغشية الملينة التي تستخدم في مجففة الملابس، ومطريات الشعر، وحتى في العديد من الرشاشات المضادة للاستاتيكا.

تحقق من فهمك # ٦: لا برق في العمل

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

الأحزمة الناقلة والتي تستخدم في نقل المواد القابلة للاشتعال لها في الغالب خيوط معدنية منسوجة في نسيجها. لماذا تكون مثل هذه الأحزمة الموصلة للكهرباء مهمة في السلامة من الحريق؟



١٠-٢ الآلات الناسخة الجافة (الزيروغرافية)

أيام الورق الكربوني وآلات الميموغراف (النسخ بالقوالب) ولّت منذ زمن. أي من المكاتب الحديثة يمكنه أن يعمل بدون آلة نسخ جاف؟ إعلانات آلات النسخ في كل مكان، وفي حين يزعم كل مُنتج أنه يصنع أفضل آلة نسخ، هذا مجرد تسويق. في الحقيقة، جميع آلات النسخ الجاف تستند على نفس المبادئ، والتي أُكتشفت عام ١٩٣٨ بواسطة تشيستر كارلسون. في هذا القسم، سوف نفحص آلات النسخ الجاف والأفكار التي تجعلها ممكنة.

أسئلة للتفكير

كيف يمكنك استخدام الكهرباء الساكنة لوضع مسحوق أسود على ورقة؟ كيف ستضع تلك الكهرباء الساكنة على الورقة؟ لكي تظهر الرموز على الورقة، كيف يجب أن تتوزع كهرباؤها الساكنة؟ في آلة النسخ، ما الذي يجب أن يفعله الضوء للكهرباء الساكنة لإنتاج نسخة من الأصل؟

تجارب يمكن القيام بها

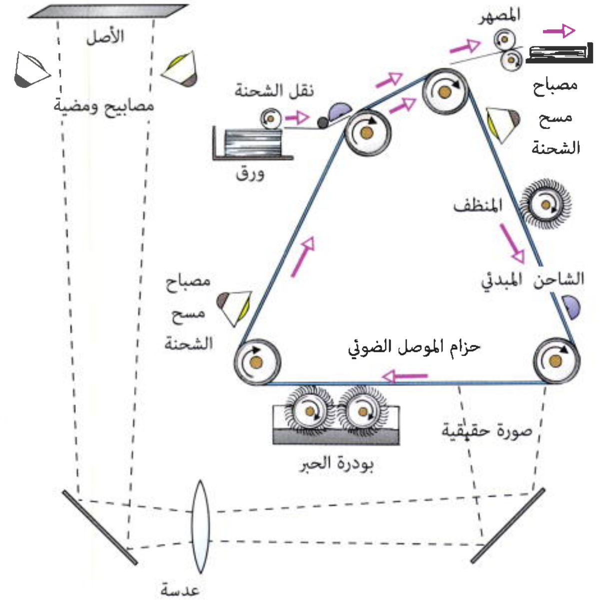
لكي تشعر بكيفية عمل آلة النسخ، قم بقص ورقة صغيرة إلى مربعات صغيرة جدا، حوالي *1 mm* في كل ضلع. ضع المربعات على طاولة وعلّق شريحة رقيقة من البلاستيك الشفاف فوقها، على بعد بضعة مليمترات. غطاء صندوق بلاستيكي شفاف سَيَفي بالغرض. الآن مرر مشطاً بلاستيكياً خلال شعرك أو افركه بكنزة عدة مرات ولامسه بأعلى الشريحة البلاستيكية. ستقفز مربعات ورقية من على الطاولة وتلتصق بالشريحة البلاستيكية. ما الذي يُمسك المربعات بالبلاستيك؟ إذا كان الورق أسود، كيف سيمكنك تشكيل أحرف على سطح البلاستيك؟

النسخ الجاف (الزيروغرافي): استخدام الضوء لطباعة النسخ

الصورة التي تطبعها آلة النسخ الجاف على ورقة تبدأ كنقش من جسيمات سوداء صغيرة جدا أو الحبر (التونر: مسحوق أسود) على سطح أملس حسّاس للضوء. تستخدم آلة النسخ الكهرباء الساكنة والضوء المنعكس من المستند الأصلي لترتيب هذا الحبر على السطح ثم تنقل الحبر بعناية إلى الورقة (شكل ١،٢،١٠). هذه العملية، والتي اخترعها تشيستر كارلسون في عام ١٩٣٨، هي في الأساس صديقتنا القديمة الكهرباء الساكنة تقوم بعمل مفيد. (انظر ٥[٣]).

في قلب آلة الزيروغراف الناسخة يوجد سطح رقيق وحسّاس للضوء مصنوع من موصل ضوئي - مادة بطبيعتها عازلة والتي تصبح موصلة عندما تتعرض لضوء. بالرغم من أن الموصل الضوئي المظلِم يمكنه أن يُبقي الشحنات الموجبة والسالبة مفصولة، إلا أن هذه الشحنات تقترب من بعضها بسرعة عندما يشع ضوء على الموصل الضوئي (شكل ٢،٢،١٠). هذه المرونة تسمح للضوء من المستند الأصلي أن يُحدّد نمط الكهرباء

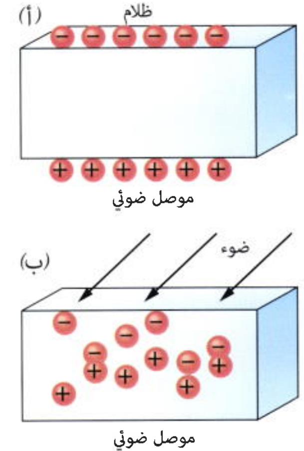
٥[٣] المخترع الأمريكي تشيستر ف. كارلسون (١٩٠٦-١٩٦٨م) كان فقيرا في شبابه ودعم أسرته ماديا بغسل النوافذ وتنظيف المكاتب بعد انتهاء الدوام المدرسي. عمله في متجر طباعة في شبابه جعله يبدأ بالتفكير حول النسخ وبدأ التجريب بالكهروفوتوغرافي. بعد دراسته في معهد كاليفورنيا للتقنية، عمل كارلسون في معامل بيل ولكن تم تسريحه أثناء الكساد الاقتصادي. بينما كان يدرس القانون، استمر كارلسون في تجاربه واخترع عملية النسخ بالكهروفوتوغرافي (xerography) في عام ١٩٣٨-١٩٣٧م. كان تطور آلات النسخ التجارية بطيئا ولم تُنتج أول آلة نسخ ناجحة سوى عام ١٩٦٠ من قبل شركة هالويد زيروكس بالطراز ٩١٤. أصبح كارلسون غنياً جدا لكنه أعطى معظم ماله للآخرين بصورة مجهولة.



شــكل ١,٢,١٠: آلــة الزيروغــراف الناســخة هذه تســتخدم حزاماً موصلاً ضوئياً لتشكيل صور بيضاء وسـوداء من المسـتند الأصلي. تبدأ عملية النسـخ بشـاحن قبـلي، والـذي يُغطـي الموصـل الضوئي بالشـحنات. بعد ذلك يُشكّل النظام البصري صورة حقيقيـة على منطقة مسـتوية من حـزام الموصل الضـوئي، منتجـا صورة مشـحونة. بعـد أن تلتقط الصورة المشـحونة جسـيمات الحبر، يُلغي المصباح الأول الماسـح للشـحنة الصورة المشحونة ويُضعف ارتبـاط الحبر بالحزام. يُنقل الحبر بعد ذلك ويُصهر في الورقة.

الساكنة على سطح الموصل الضوئي وبناء على ذلك وضع الحبر على الورقة.

تبدأ كل دورة نسخ في الظلام برش آلة النسخ شحنات سالبة على موصلها الضوئي. على الجانب الآخر من الموصل الضوئي يوجد سطح معدني موصل بالأرض - موصل بالأرض بمعنى أنه موصل كهربائيا بالأرض بحيث تكون الشحنات حرة في التدفق بين الاثنين. حينما تهبط الشحنات السالبة على السطح المفتوح للموصل الضوئي، فإنها تجتذب شحنات موجبة على السطح المعدني تحتها. عندما تكتمل عملية رش الشحنات، يكون السطح المفتوح للموصل الضوئي مُغطى بالتساوي بشحنات سالبة بينما السطح المعدني تحته مُغطى بالتساوي بشحنات موجبة (شكل ٣,٢,١٠ أ).



شــكل ٢,٢,١٠: (أ) في الظلام، يكون الموصل الضوئي عازلاً كهربائياً بحيث الشـحنات الكهربائية المنفصلة على أسـطحه تظـل هناك للأبـد. (ب) عندمـا يتعـرض الموصـل الضـوئي للضوء، يصبح موصلاً كهربائياً وتتحد الشحنات الكهربائية المتعاكسة مع بعضها البعض بعد وقت قصير.

بعد عملية الشحن المبدئي هذه، تستخدم آلة النسخ عدسة لتُلقي صورة واضحة للمستند الأصلي على سطح الموصل الضوئي. سوف نفحص العدسات وتكوين الصور عندما ندرس الكاميرات في الفصل الخامس عشر. الآن ما يهُمّنا هو أن الضوء يشع على الموصل الضوئي فقط في أماكن محددة، مقابلاً للمناطق البيضاء في المستند الأصلي.

هناك تقنيتان قياسيتان لتعريض الموصل الضوئي للضوء. بعض آلات النسخ تُضيء المستند الأصلي بأكمله بواسطة الضوء الساطع لمصباح متوهج، وتُلقي بصورة كاملة على منطقة مستوية من حزام الموصل الضوئي. في آلات النسخ الأخرى، يُضيء مصباح متحرك أو مرآة متحركة المستند الأصلي جزءاً جزءاً، وتُلقى الصورة على هيئة شريط متحرك على أسطوانة موصلة ضوئية تدور حول نفسها.

في أي من الطريقتين، تتحرك الشحنات خلال مناطق الموصل الضوئي المعرضة للضوء، تاركة تلك المناطق متعادلة كهربائيا (شكل ٣,٢,١٠ ب). النتيجة هي صورة مشحونة - شكل من الشحنات الكهربائية على سطح الموصل الضوئي والذي يطابق تماما شكل الحبر على المستند الأصلي (شكل ٣,٢,١٠ ج).

لتطوير هذه الصورة المشحونة لتصبح صورة مرئية، تُعرّض آلة الزيروغراف الناسخة الموصل الضوئي لجسيمات حبر موجبة الشحنة (شكل ٣,٢,١٠ د).هذا الحبر هو عبارة عن مسحوق بلاستيكي رقيق عازل يحتوي على صبغة، سوداء في المعتاد. إن إضافة الحبر للموصل الضوئي يجب أن تتم بلطف وفي الغالب تحدث بمساعدة كرات حديدية مطلية بمادة التفلون. هذه الكرات الصغيرة جدا تُمسك سوية في فتيلات طويلة بواسطة عمود مغناطيسي يدور حول نفسه، بحيث يُشابه العمود فرشاة تدور بسرعة لها شعر ناعم. يمسح هذا الشعر جسيمات الحبر من صينية تخزينها وإلى الموصل الضوئي. إن الاتصال بالتفلون يترك جسيمات الحبر مشحونة بشحنة موجبة، لذا فهي تلتصق بالأجزاء المشحونة بشحنة سالبة في الموصل الضوئي (شكل ٣,٢,١٠ هـ).

يحمل الموصل الضوئي الآن صورة سوداء من المستند الأصلي، وهي الصورة التي يجب أن تنقلها آلة النسخ إلى الورقة. قبل أن تشرُع بهذا النقل، تُضعف الآلة الناسخة إمساك الموصل الضوئي بالحبر أولا وذلك بتعريضه للضوء من مصباح مسح الشحنات. هذا الضوء يُلغي شحنة الموصل الضوئي (شكل ٣,٢,١٠ و) ويترك جسيمات الحبر الموجبة الشحنة ملتصقة فقط بشكل غير محكم بسطحه (شكل ٣,٢,١٠ ز).

بعد ذلك تنقل الآلة الناسخة الصورة الحبرية إلى ورقة فارغة بضغط تلك الورقة قليلا على الموصل الضوئي بينما تقوم برش شحنات سالبة على ظهر الورقة (شكل ٣,٢,١٠ ح). يتجاذب الحبر المشحون بشحنة موجبة مع الورقة السالبة الشحنة ويغادران الموصل الضوئي معاً. بعدها تسخّن الآلة الناسخة الصورة وتضغطها، فتصهر الحبر على الورقة بشكل دائم (شكل ٣,٢,١٠ ط). بمجرد أن تُنقل الصورة إلى الورقة، تنظف الآلة الناسخة سطح موصلها الضوئي استعدادا لعملية النسخ التالية: يُلغي مصباح ثانٍ ماسح للشحنة أي شحنة متبقية وتقوم فرشاة أو ممسحة مطاطية بإزالة أي حبر متبقٍّ.

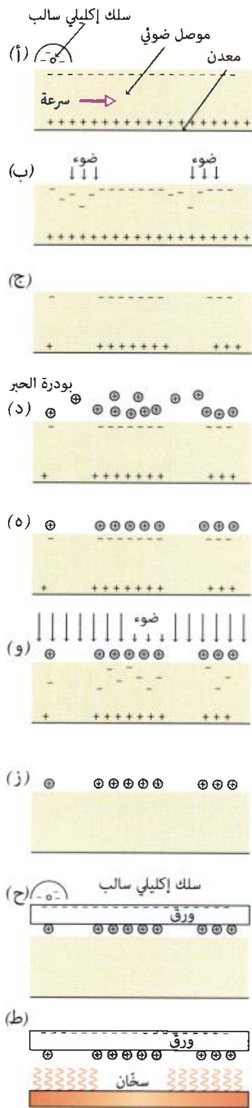
بهذه المقدمة للتصوير الكهروغرافي، يمكنك الآن تفسير العديد من الأشياء المتعلقة بالآلات الناسخة. على سبيل المثال، حينما تُصلح انسداداً ورقياً في الآلة الناسخة، قد تجد أنك أزلت نسخاً غير مكتملة - بعضها يحمل صوراً حبرية لم يتم صهرها على الورقة. يخرج حبر النسخة غير المنصهرة في يديك لأنه ممسوك في محله بواسطة قوى كهروستاتيكية فقط. وعندما تستبدل «أسطوانة الحبر» في آلة نسخ شخصية، بالإضافة لوضع حبر جديد، فأنت أيضا تُركِّب نظام شحن مبدئي، وأسطوانة موصل ضوئي، وقضيب حبر جُدداً (شكل ٤,٢,١٠).

ولكننا مررنا بسرعة على ثلاث قضايا فيزيائية مهمة. سنترك اثنتين منها للفصول القادمة: لماذا يصبح الموصل الضوئي موصلا عندما يتعرض للضوء (الفصل الثاني عشر عن الإلكترونيات) وكيف تلقي العدسة صورة المستند على الموصل الضوئي (الفصل الخامس عشر عن البصريات). ولكن القضية الثالثة مناسب تناولها الآن ولذا سنفحصها بعناية: كيف ترش الآلة الناسخة الشحنات على الأسطح.

تحقق من فهمك # ١: النسَخ المتلاصقة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

عندما تخرج النُسخ من آلة الزيروغراف الناسخة، فإنها تميل للالتصاق بالأشياء وجذب الوبر. ما الذي يتسبب في هذا التأثير؟



شكل ٣,٢,١٠: يُغطى الموصل الضوئي أولا (أ) بطبقة متساوية من الشحنات السالبة. التعرض للضوء (ب) يمسح بعض الشحنات ليُشكل صورة مشحونة (ج). تجذب الصورة المشحونة (د) جسيمات الحبر الموجبة الشحنة (هـ). تُمسح الصورة المشحونة (و) لتطلق جسيمات الحبر (ز). يُنقل الحبر إلى الورقة السالبة الشحنة (ح) وتنصهر على الورقة بالحرارة (ط).

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٤,٢,١٠: تضع آلة الزيروغراف الناسخة هذه (الناسخة الجافة) أسطوانة الموصل الضوئي، ومخزون الحبر، وسلك الشحن الرئيسي داخل أسطوانة مستهلكة. بعد أن تمر الورقة خلال الأسطوانة، ينصهر الحبر على سطحها وتغادر آلة النسخ.

التفريغ والمجالات الكهربائية

عند بدء دورة النسخ، تُغطي آلة الزيروغراف الناسخة سطح موصلها الضوئي بالشحنات الكهربائية بشكل متساوٍ. بما أن عملية الشحن المبدئي هذه تحدث في الظلام، مع كون السطح عازلاً كهربائياً، فإن الشحنات يجب أن تُرش عليه كالطلاء. راش الشحنات في الآلة الناسخة هو تفريغ هالي – أي شرارة خفيفة مستمرة تتشكل في الهواء بالقرب من إبرة أو سلك رفيع يُبقى عند فولطية عالية.

هو نوع من التفريغ – تدفق الشحنة الكهربائية خلال غاز. يُعدّ الهواء في العادة عازلا لأن ذراته وجزيئاته متعادلة كهربائيا ولا يمكنها نقل الشحنة من مكان لآخر. ولكن بتلقيح الهواء بكثافة بجسيمات فردية مشحونة، فإن الآلة الناسخة تستطيع أن تحوّل ذلك الهواء إلى موصّل ثم تنتج تفريغاً فيه. لكن كيف تلقّح الآلة الناسخة الهواء بالشحنات وتنتج تفريغه؟ وكيف تستخدم هذا التفريغ لتغطية سطح موصلها الضوئي؟ للإجابة على تلك الأسئلة، سنحتاج معرفة المزيد عن القوى الكهروستاتيكية والفولطيات وأيضا عن مفهوم مرتبط بذلك: المجالات الكهربائية.

بما أن الشحنات الحرة يصعب وجودها في الهواء، فإن الآلة الناسخة تبدأ بمجرد بضعة جسيمات مشحونة وتستخدمها لتوليد المزيد. الفكرة بسيطة: تستخدم الآلة الناسخة القوى الكهروستاتيكية لتسريع الشحنات الابتدائية لسرعات هائلة وتجعلها تصطدم بجسيمات الهواء المتعادلة كهربائيا. عندما يصطدم جسيم الهواء المتعادل كهربائيا بقوة كافية سيتفكك الجسيم إلى أجزاء مشحونة بشحنات متعاكسة وبالتالي يُضيف شحنتين حرتين إضافيتين إلى الهواء. هذه الشحنات الجديدة تنضم للخليط، فتتسارع، وتصطدم، وتُفكك المزيد من جسيمات الهواء. يتلو ذلك شلال من التصادمات و«يتفكك» الهواء – فيتحوّل من عازل إلى موصّل. تستخدم الآلة الناسخة بعد ذلك هذا الهواء الموصّل لرش الموصل الضوئي بالشحنات.

إذاً من أين تأتي تلك الشحنات المبدئية؟ من المدهش أنها موجودة هناك مسبقا، وهي نتاج الأشعة الكونية والنشاط الإشعاعي الطبيعي! يحتوي كل سنتيمتر مكعب من الهواء المعتاد على ألفين جسيم مشحون تقريباً، نصفها موجب والنصف الآخر سالب على وجه التقريب. باعتبار أن هذا الحجم نفسه من الهواء يحتوي على تقريبا 3×10^{19} من الجسيمات المتعادلة، فإن الأجسام المشحونة ليست كثيرة. لكنها كافية لجعل التفريغ يبدأ.

لتنمية تلك الشحنات الابتدائية للوصول للعدد الهائل المطلوب، يجب على الآلة الناسخة أن تجعلها تتسارع بعنف. إن جسيمات الهواء المتعادلة مجمعة بكثافة بحيث يصعُب على الجسيمات المشحونة أن تزيد سرعتها قبل أن تصطدم بشيء وتتباطأ. لإعطاء كل شحنة ابتدائية فرصة جيدة لكسر الجسيم المتعادل الأول الذي تصطدم به، فإنه يجب على الآلة الناسخة أن تقوم بتسريع تلك الشحنة بسرعة.

تقوم الآلة الناسخة بتسريع شحناتها الحرة باستخدام قوى كهروستاتيكية. حتى الآن، ربطنا القوى الكهروستاتيكية بأزواج من الشحنات، كل شحنة تدفع أو تسحب الأخرى. بما أن القوى الفردية على جسم تتجمع لتُعطي محصلة القوى على ذلك الجسم، فإنه من السهل معرفة كيف تؤثر ثلاث، أو أربع، أو خمس شحنات على بعضها البعض. ولكن في أسلاك وتفريغ الآلة الناسخة، هناك العديد من الشحنات الفردية بحيث يُعد جمع قواها فعليا مستحيلاً. نحتاج طريقة أخرى لتصنيف القوة الكهروستاتيكية الإجمالية على شحنة معينة.

بدلا من التفكير بالتفاعلات العديدة بين تلك الشحنة وجميع الشحنات الأخرى التي حولها (شكل ٥,٢,١٠ أ)، يمكننا رؤية القوة الكهروستاتيكية على شحنتنا كنتيجة تفاعلها الوحيد بشيء محلي: مجال كهربائي – وهو خاصية للفراغ تبذل قوة كهروستاتيكية على شحنة (شكل ٥,٢,١٠ ب). من هذا المنظور الجديد، تتسارع شحنتنا إلى الأمام لأنها تتفاعل مع المجال الكهربائي المحلي، مجال ينشأ من جميع الشحنات الكهربائية المحيطة.

يظهر هذا المجال الكهربائي كأنه ليس إلا وسيطاً: تُنتج الشحنات المحيطة المجال الكهربائي وهذا المجال الكهربائي يدفع على

شحنتنا. ولكن في الفصول القادمة، سوف نرى أن المجال الكهربائي هو أكثر من ذلك، أكثر من ما يبدو كخيال غير ضروري. ذلك لأن المجال الكهربائي موجود حقيقة في الفراغ، بشكل مستقل عن الشحنات التي تنتجه. في الواقع، كثيراً ما تنشأ المجالات الكهربائية عن أشياء غير الشحنات ويمكنها أن تؤثر في أشياء غير الشحنات أيضا. يتفاوت المجال الكهربائي للآلة الناسخة بناء على الموقع، بمعنى أن القوة الكهروستاتيكية على شحنتنا تعتمد على موقعها. هذه القوة تساوي حاصل ضرب الشحنة في المجال الكهربائي وتشير في اتجاه ذلك المجال الكهربائي. يمكننا كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية:

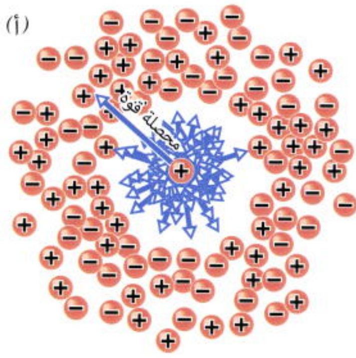
القوة = الشحنة × المجال الكهربائي (١,٢,١٠)

ورمزيا $F=qE$

وفي لغة الحياة اليومية: يتسارع الوبر المشحون بسرعة في منطقة مليئة بالكهرباء الساكنة،

حيث تتجه القوة في اتجاه المجال الكهربائي. لكن لاحظ أن جسيماً يحمل مقداراً سالباً من الشحنة (مثل الإلكترون) يواجه قوة في الاتجاه المعاكس للمجال الكهربائي. وحدة المجال الكهربائي في النظام العالمي SI هي نيوتن-لكل-كولوم (اختصارا N/C).

تستخدم الآلة الناسخة مجالاً كهربائياً قوياً جدا «لتفكيك» الهواء لكي تتمكن من إعمال التفريغ. يقوم ذلك المجال بتسريع الشحنات بسرعة جدا بحيث تحدث شلالات من التصادمات وتملأ الهواء بشحنات حرة. من المؤسف أنك لا يمكنك أن تشعر بالمجالات الكهربائية مباشرة، لذا من الصعب تصوّر مجال قوي. سنعمل على حل هذه المشكلة، لكن الآن فقط تذكّر أن المجالات الكهربائية القوية يمكنها أن تبدأ تفريغات في الهواء. **هكذا تنتج العواصف الرعدية البرق!**





شكل ٥,٢,١٠: (أ) عندما تتفاعل شحنة مع العديد من الشحنات الأخرى، فإن جمع القوى الكهروستاتيكية الفردية المؤثرة على تلك الشحنة للحصول على محصلة القوى عليها يصبح مهمة مروعة. (ب) في الغالب من الأسهل تعريف المجال الكهربائي كوسيط. تُنتج الشحنات الأخرى هذا المجال الكهربائي، والذي بدوره يبذل قوة كهروستاتيكية على الشحنة (حُذفت للتوضيح). يشير سهم المجال الكهربائي المار خلال النقطة الحمراء لمقدار واتجاه القوة التي تواجهها شحنة اختبار موجبة عند موقع النقطة الحمراء.

تحقق من فهمك #٢: إلكترونات طبية

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

يستخدم المعجّل الخطي الطبي مجالاً كهربائياً قوياً لتسريع الإلكترونات إلى الأمام وإعطائها طاقات حركية هائلة. تدخل هذه الإلكترونات ذات الطاقة العالية في المريض وتقتل الخلايا السرطانية. في أي اتجاه يشير المجال الكهربائي للمعجّل؟

دقق في أرقامك # ١: طفو الوبر

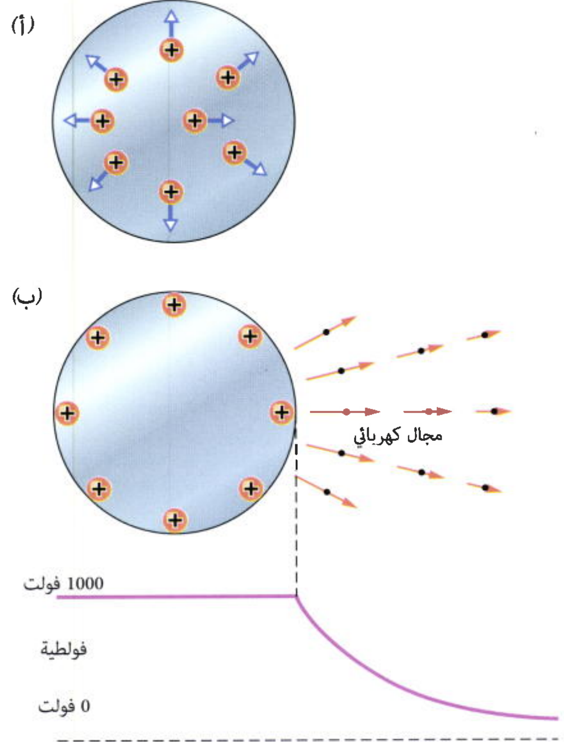
(للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

ترفض قطعة من وبر مشحون أن تسقط لأن مجالاً كهربائياً يدعم وزنها تماماً. إذا كان وزن الوبر 10^{-8} N وله شحنة موجبة مقدارها 10^{-11} C، ما هو المجال الكهربائي الذي يدعمها؟

الموصلات وتحدّرات الفولطية

يستخدم نظام الشحن المبدئي للآلة الناسخة التفريغ الهالي اللطيف الذي ينشأ في المجال الكهربائي القوي خارج سلك رقيق ذي فولطية عالية. ينقل هذا التفريغ الشحنات إلى سطح الموصل الضوئي ويغطيه بشكل متساوٍ. لكن لفهم لماذا يوجد مجال كهربائي قويّ خارج سلك رقيق ذي فولطية عالية ولماذا يكون التفريغ الذي يُنتجه «لطيفاً»، فإننا نحتاج لبعض الخلفية. لنبدأ بالنظر للمجالات الكهربائية داخل وخارج الموصلات الكهربائية.

تأمل أبسط جسم موصّل: كرة معدنية صلبة. إذا أطلقت بعضاً من الشحنات الموجبة داخل تلك الكرة (شكل ٦,٢,١٠ أ)، ما الذي سيحدث لها؟ بما أنها تتنافر مع بعضها البعض، فإن تلك الشحنات ستتسارع للخارج



شـكل ٦،٢،١٠: (أ) عند وضع شـحنات متشـابهة داخل كرة موصلة، فإنهـا تتنافر مع بعضها البعض وتتسارع باتجاه سطح الكرة. (ب) عندما تصل تلك الشـحنات للاتزان على سـطح الكـرة، يكون للكرة فولطية واحدة متسـاوية ومجـال كهربائي صفري داخلهـا. تتناقص الفولطية خـارج الكرة إلى مقدار صفري ويوجد هناك مجال كهربائي.

وتبتعد عن بعضها. في الحقيقة، ستغادر الكرة كلية إذا لم تكن مرتبطة كيميائيا بمعدنها. بعد أن تمكث الشحنات لحظات في تخليص ذاتها من الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة الإضافية - في الأساس على هيئة حرارة - فإن الشحنات تستقر في أوضاع اتزان مستقر على سطح الكرة (شكل ٦،٢،١٠ ب). عند نقطة اتزانها، فإن القوة الكهروستاتيكية إلى الخارج التي تواجهها كل شحنة من الشحنات الأخرى توازن تماما القوة الكيميائية إلى الداخل التي تواجهها من المعدن. محصلة القوة عليها هي صفر.

عند الاتزان، تكون كل شحنة قد قللت من طاقتها الكامنة الكلية. فعلى كل، لا تستطيع الشحنة التوقف عن التسارع إلا إذا لم يتواجد هناك أي اتجاه يمكنها أن تتحرك فيه لتقليل طاقتها الكامنة أكثر. لكن المدهش حول كيفية ترتيب الشحنات نفسها على سطح الكرة هو أن كل شحنة ينتهي بها المطاف بنفس الطاقة الكامنة الكلية. ذلك لأنه إذا كان لإحدى الشحنات طاقة كامنة كلية أقل من الأخريات، فإن الشحنات الأخرى ستتسارع باتجاهها لتقلل من طاقاتها الكامنة الكلية أيضا!

بما أن الطاقة الكامنة الوحيدة التي تؤثر في الشحنات بشكل كبير في كرتنا الصغيرة المتجانسة هي الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة، فإن كل شحنة في كرتنا لها في الأساس نفس الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة. وبما أن الفولطية هي الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة لكل وحدة شحنة، فإن الطاقات الكامنة المتساوية على الشحنات المتساوية تعني فولطيات متساوية - أي للكرة بأكملها فولطية واحدة منتظمة! في تشبيهنا للفولطية بالارتفاع، فإن هذه الملاحظة تشابه الحقيقة أنه عند الاتزان، يكون لمستوى الماء في مسبح ارتفاع واحد منتظم.

بسبب تناظر الكرة المثالي، فإن الشحنات عند الاتزان تنتشر بشكل متساوٍ على سطحها. لو كنا اخترنا جسماً موصّلاً أقل تناظر، مثل السلك المعدني الرقيق في الآلة الناسخة، فإن الشحنات في حالة الاتزان ما كانت لتنتشر بشكل متساوٍ. ومع هذا، كانت ستظل تلك الشحنات خارج الجسم ولظل لها فولطية واحدة منتظمة.

الفولطية والشحنة على جسم موصّل

الجسم الموصّل المتجانس، عند كون شحناته في وضع اتزان، له فولطية واحدة منتظمة ومحصلة الشحنة في أي موضع داخله هي صفر.

لكن في حين الفولطية منتظمة في وعلى السلك الموصل الرقيق في الآلة الناسخة، لكنها تتفاوت بسرعة مع الموقع خارج ذلك السلك (شكل ٦,٢,١٠ ب). يرافق هذا التفاوت الكبير المكاني في الفولطية مجال كهربائي قوي. اصطلاحا يُسمّى تحدّراً فولطياً، ويمكنك تصور التفاوت المكاني في الفولطية «كانحدار» في الفولطية. في تشبيهنا الفولطية بالارتفاع، يُشابه التحدّر الفولطي «تحدّراً ارتفاعياً» - أي انحدار هضبة اعتيادية. وكما أن الماء يتسارع بسرعة لأسفل منحدر حاد باتجاه ارتفاع أدنى، كذلك الشحنة تتسارع بسرعة أسفل تحدّر فولطي كبير باتجاه فولطية أقل.

بما أن كلاً من المجالات الكهربائية والتحدرات الفولطية تتسبب في تسارع الشحنات، فإنه يجب أن لا يُفاجئك معرفة أن التحدّر الفولطي هو مجال كهربائي. بالرغم من أننا سنكشف عن مصدر ثانٍ للمجالات الكهربائية في الفصل التالي، سوف نتعامل الآن مع التحدّر الفولطي والمجال الكهربائي كشيئين متكافئين. يُمكن كتابة العلاقة بينهما كمعادلة لفظية: (٢,٢,١٠)

$$\text{المجال كهربائي} = \text{التحذر الفولطي} = \frac{\text{هبوط الفولطية}}{\text{المسافة}}$$

ورمزيا:

$$E = \text{Gradient}\,(v)$$

وفي لغة الحياة اليومية: تندفع الشحنات لأسفل هبوط حاد في الفولطية، مثل اندفاع الدراجات لأسفل هبوط حاد في الارتفاع. حيث يشير المجال الكهربائي في اتجاه انخفاض الفولطية الأسرع.

تُعطينا هذه العلاقة طريقة ثانية للنظر للمجال الكهربائي. إضافة لكونه القوة الكهروستاتيكية المبذولة على وحدة شحنة، فإن المجال الكهربائي هو أيضا الهبوط في الفولطية لكل وحدة مسافة. وبالتالي، وحدة المجال الكهربائي في النظام العالمي SI لها شكل آخر: فولت-لكل-متر (اختصارا V/m). وحدة V/m هي تماما نفس الوحدة N/C.

تحقق من فهمك #٣: لا تخرج من سيارة ساخنة! (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

أثناء عاصفة رعدية، تضع ضربة برقية كمية هائلة من الشحنات الساكنة على سيارتك. لماذا لا تلاحظ تلك الشحنة طالما ظللت داخل السيارة؟

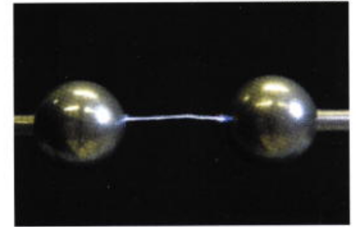
دقق في أرقامك #٢: ركوب المجال (للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

يدفع مجال كهربائي جسيمات مشحونة خلال أنبوب مصباح فَلْوَري، فيسمح له بإنتاج ضوء. لكي يعمل بشكل جيد، يحتاج الأنبوب الفلوري المعتاد مجالا كهربائيا مقداره حوالي 100V/m. إذا كان متوسط فرق الجهد بين طرفي الأنبوب هو 120volts، فما الطول الممكن لذلك الأنبوب الفلوري؟

الأسلاك الرقيقة والفولطيات العالية: التفريغ الهالي

يتفكك الهواء العادي في مجال كهربائي مقداره حوالي 3×10^6 فولت-لكل-متر، أو بالوحدات المألوفة حوالي 30,000 فولت-لكل-سنتيمتر. في ذلك المجال، تتسارع الشحنات الحرة بسرعة بحيث أن شلالاً من التصادمات المحررة للشحنات يحوّل الهواء فجأة من عازل تام تقريباً إلى موصل جيّد إلى حد معقول.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٧,٢,١٠: هاتان الكرتان المعدنيتان على بُعد ١cm عن بعضهما. عندما يكون فرق الجهد بينهما حوالي 30,000V، فإن الهواء بينهما يتفكك ويشكّل شرارة.

يمكنك أن تُنتج مثل هذا المجال الكهربائي القوي وحدك. في يوم شتائي جاف، يمكنك أن تُغطي نفسك بشحنات موجبة وترفع فولطيتك لحوالي 30,000V بمجرد جر نعل حذائك المطاطي عبر سجاد من الأكريلك. ومن ثَم حينما تقترب من مقبض باب متصل بالأرض عند 0V، فإن فرق الجهد بين مقبض الباب ويدك سيكون 30,000V. عندما تكون يدك على بعد حوالي 1cm من مقبض الباب، سيصل المجال الكهربائي لمقدار 30,000 فولت-لكل-سنتيمتر وسيتفكك الهواء بشرارة رائعة (شكل ٧,٢,١٠).

بما أن يدك ومقبض الباب متماثلان في الحجم والشكل، فإن الفولطية تتغيّر بسلاسة بينهما (شكل ٨,٢,١٠ أ). تتغيّر بشكل ثابت من V0 عند مقبض الباب إلى 30,000V على يديك، لذا فإن تحدّر الفولطية أو المجال الكهربائي منتظم تقريباً. لكن عندما يختلف جسمان في الحجم بشكل كبير، فإن الجسم الأكبر يسيطر على الفولطية في الفراغ بينهما. على سبيل المثال، إذا أمسكت بدبوس طويل بيدك حينما تقترب من مقبض الباب، فإن مقبض الباب سيتحكّم بالفولطية في معظم المسافة للدبوس، وسيحدث كل الزيادة في الفولطية تقريباً خارج رأس الدبوس مباشرة (شكل ٨,٢,١٠ ب). بدلاً من أن يكون تحدّر الفولطية أو المجال الكهربائي منتظما فإنه سيكون أقوى ما يمكن بالقرب من رأس الدبوس.

تُحسن الآلة الناسخة استخدام هذا المجال غير المنتظم. يُحاط سلكها الرقيق ذو الفولطية العالية تماماً تقريباً بغطاء معدني أكبر منه بكثير. السلك رقيق جدا بحيث يختفي تأثيره فقط على بُعد سمك شعرة من سطحه ويسيطر الغطاء الموصل بالأرض على الفولطية على طول الطريق إلى السلك تقريباً. على الرغم من أن شحنة السلك السالبة هي فقط 3,000V- وهو على بُعد 1cm تقريبا من الغطاء، فإن الفولطية تتغير بسرعة في الهواء خارج هذا السلك مباشرة بحيث يتجاوز المجال الكهربائي هناك 30,000 فولت-لكل-سنتيمتر بسهولة ويُفكك الهواء.

إن التفريغ الذي يتشكّل بالقرب من السلك الرقيق هو تفريغ متميّز وذاتي التنظيم - أي تفريغ هالي (شكل ٩,٢,١٠). في حين لا يمكن لمعظم التفريغات أن تتحكم في عدد الشحنات الحرة التي تنتجها، إلا أن التفريغ الهالي يحافظ تلقائيا على إنتاج ثابت. بما أن الشحنات الحرة تُشكّل فقط في المجال الكهربائي القوي بالقرب من موصلها الرقيق، فإن معدل إنتاجها حسّاس جدا للتغيرات في السمك الفعلي لذلك الموصل. إذا كان هناك الكثير من الشحنات الحرة في الهواء القريب من الموصل، فإن قدرتها على توصيل الكهرباء بشكل فعّال تزيد من سمك الموصل، وتُضعف المجال الكهربائي، وتبطئ إنتاج الشحنات الحرة. يصحح التفريغ خطأه.
بسبب هذا التأثير الاستقراري، يحافظ الهواء في التفريغ الهالي على توصيل كهربائي مستقر والذي يُعد مثالياً لشحن الموصل الضوئي في الآلة الناسخة. ولكن التفريغات الهالية كانت مألوفة قبل الآلات الناسخة بكثير. كثيراً ما تحدث تلقائياً بقرب نقاط حادة أو أسلاك رقيقة عند فولطيات عالية، مؤدية لتسرب الشحنة من خطوط نقل الطاقة وأحيانا تنتج وهجاً يُسمى نار ساينت إلمو على سواري وحبال الأشرعة في المراكب الشراعية (انظر ◊[٤]).

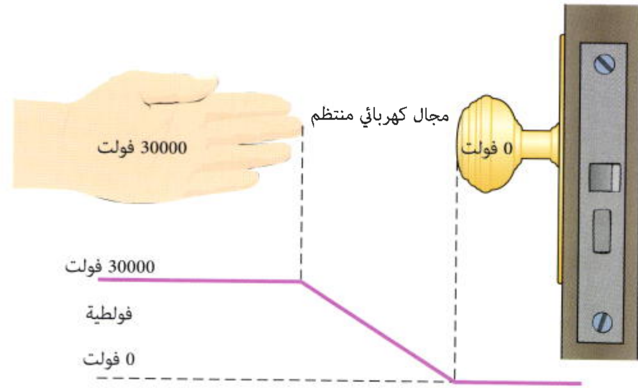
◊[٤] على نقيض الاعتقاد الشائع، أعمدة البرق لا تجذب ضربات البرق ببساطة لكي تحمي السطح المحيط. بدلا من ذلك، تُنتج تفريغات هالية تقلل من أي تجمّعات محلية للشحنة الكهربائية. بجعل الشحنة الكهربائية المحلية متعادلة، فإن عمود البرق يقلل من احتمالية ضرب البرق للمنزل. توجد أجهزة مشابهة، تُسمى مبددات الكهرباء الساكنة، بالقرب من أطراف أجنحة الطائرة فتحمي الطائرات من ضربات البرق.

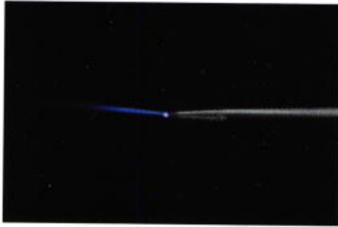
تحقق من فهمك # ٤: دبوس حماية (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

يمكنك تجنب صدمة الكهرباء الساكنة بالإمساك بإبرة حادة حينما تقترب من مقبض باب أو جدار معدني. كيف تحميك هذه الإبرة من الكهرباء الساكنة؟

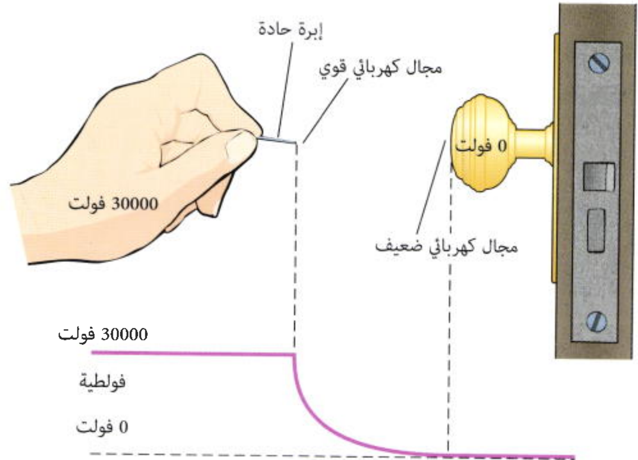
الاستعداد للنسخ: الشحن بالحث

التفريغ الهالي يقوم بأكثر من مجرد تحويل الهواء إلى موصّل؛ فهو يُنتج أيضا رشاً للشحنات الكهربائية إلى الخارج. تُدفع تلك الشحنات إلى الخارج بواسطة المجال الكهربائي المحيط بسلك الهالة. بما أن سلك الآلة





شكل ٩,٢,١٠: المجال الكهربائي بالقرب من هـذا الدبوس الحـاد ذي الفولطية العالية قـوي جدا بحيـث يُفكك الهواء ويُشـكِّل تفريغاً هالياً. ينتـج الوهج الناتج من قِبل جسيمات الهواء التي تحصل على طاقة من التفريغ.



شـكل ٨,٢,١٠: فولطيتك هي 30,000V عندمـا تمد يدك لمقبض البـاب ذي 0V. (أ) بما أن يدك ومقبض الباب متماثلان في الحجم، فـإن الفولطية تتناقص بثبـات بينهما والمجـال الكهربائي منتظم تقريبا. (ب) ولكن عندما تُمسك بدبوس، فإن الفولطية تهبط فجأة وبسرعة بالقرب من رأسـه الحاد ويكون المجـال الكهربائي هناك قوياً جدا.

الناسخة الهالي له فولطية سالبة، فإن المجال الكهربائي المحيط يُشير نـحو ذلك السلك. وبما أن الشحنات السالبة تتسارع في اتجاه عكس اتجاه المجال الكهربائي، فإن سلك الآلة الناسخة الهالي ينتج وابلا من الشحنات السالبة إلى الخارج. تُرش هذه الشحنات على سطح الموصل الضوئي بينما يتحرك بثبات عبر سلك الهالة، وبالتالي يكتسب الموصل الضوئي غطاء منتظماً من الشحنات السالبة.

حينما تهبط كل شحنة سالبة، فإنها تجذب شحنة موجبة على السطح المعدني الموصل بالأرض والموجود أسفل الموصل الضوئي، والتجاذب بين تلك الشحنات المتعاكسة يبقيهما في مكانهما بإحكام. بينما يكتسب السطح المفتوح للموصل الضوئي شحنته السالبة المنتظمة، فإن الطبقة المعدنية تحتها تكتسب شحنة موجبة مكافئة (شكل ٣,٢,١٠ أ). هذه العملية، التي يكتسب فيها الموصل الأرضي شحنة خلال التجاذب بين الشحنات المتعاكسة القريبة، تُسمى «الشحن بالحث».

إن الشحنة الموجبة المستحثة على الجانب المعدني من الموصل الضوئي مهمة لعملية الزيروغراف لعدة أسباب. أولا: هي تُخفِّض الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة للشحنة السالبة بحيث لا تكون الفولطية السالبة للسطح هائلة. ثانيا: بدون وجود تلك الطبقة الموجبة القريبة، فإن التنافر بين الشحنات المتشابهة سيدفع الشحنات السالبة على السطح المفتوح باتجاه حواف الموصل الضوئي ويشوّه الصور الناتجة.

ولكن الأكثر أهمية، أن طبقة الشحنة الموجبة تُعطي طبقة الشحنة السالبة مكانا للتحرك إليه عندما يتعرض الموصل الضوئي للضوء! كلما يحوّل الضوء المنعكس من المستند الأصلي قطعة من الموصل الضوئي إلى موصّل، فإن طبقات الشحنات السالبة والموجبة تندفع نحو بعضها وتُلغي بعضها البعض. تبعا لذلك فإن القطعة الناتجة من الموصل الضوئي غير المشحونة لا تجذب حبرا فتنتج بقعة بيضاء على النسخة المكتملة.

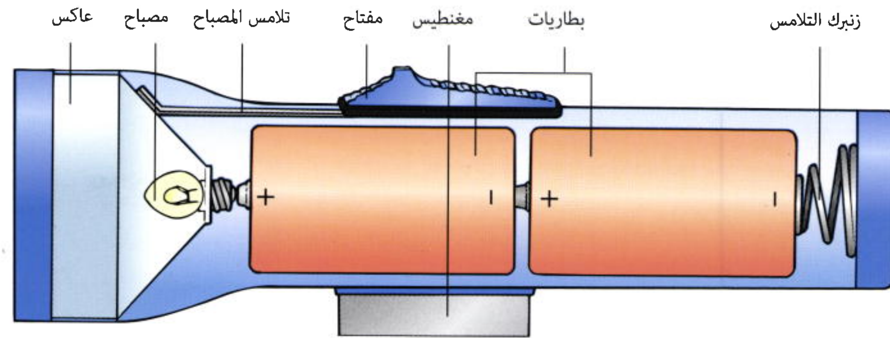
بعد إكمال دورة عمل كاملة، يمكننا الآن رؤية كيف تُنجز الآلة الناسخة هدفها. تستخدم الآلة الناسخة تفريغاً هالياً لتغطية سطح الموصل الضوئي بشحنة سالبة ثم تمسح أجزاء من طبقة الشحنة تلك بشكل انتقائي بواسطة ضوء من المستند الأصلي. تجذب البقع المشحونة المتبقية على الموصل الضوئي حبراً أسود مشحوناً بشحنة موجبة، والذي ينتقل بعدها إلى الورقة بشكل نهائي.

النقطة الوحيدة الإضافية التي تستحق الذكر هي أنه، لأسباب تقنية، بعض الآلات الناسخة تغطي موصلاتها الضوئية بغطاء أولي من الشحنات الموجبة بدلا من السالبة وبعدها تستخدم تلك الشحنة لجذب الحبر المشحون بشحنة سالبة. هذه الآلات الناسخة تضع فولطيات موجبة عالية على أسلاكها الرقيقة بحيث ترش هالاتها شحنات موجبة.

تحقق من فهمك # ٥: القضيب الساخن

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

يصل سلك سميك بين قضيب البرق على برج دار القضاء والأرض، وفي العادة يضمن أن القضيب متعادل كهربائيا. لكن عندما تحلق سحابة مشحونة بشحنة سالبة فوقها، ما هي الشحنة التي يكتسبها القضيب؟



١٠-٣ الكشّافات الضوئية

ليس هناك الكثير خلف الكشّاف الضوئي المعتاد؛ يمكنك رؤية أجزائه القليلة عندما تفتحه لتستبدل بطارياته. لكن الكشّاف ليس جهازاً ميكانيكياً، بل هو كهربائي: يحتوي على دائرة كهربائية ومعظم مكوناته تُشارك في تدفق الكهرباء. فهم كيفية عمل الكشّاف الضوئي يعني فهم كيفية عمل الدائرة الكهربائية وكيف تحمل الكهرباء القدرة من البطاريات إلى المصباح. كما سنرى، الكشّافات الضوئية ليست بسيطة كما تبدو.

أسئلة للتفكير

لماذا تكون بعض الكشّافات الضوئية أكثر سطوعا من كشّافات ضوئية أخرى؟ لماذا من المهم أن تشير كل البطاريات في نفس الاتجاه؟ ما الفرق بين البطاريات القديمة والجديدة؟ ما الذي يجعل الكشّاف الضوئي يصبح باهتاً فجأة أو ساطعاً عندما تهزّه؟

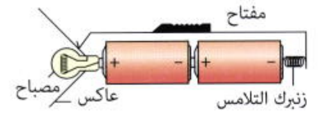
تجارب يمكن القيام بها

ابحث عن كشّاف ضوئي يستخدم بطاريتين أو أكثر قابلة للإزالة. افتحه. ما الذي قام به المفتاح لجعل الكشّاف الضوئي ينتج ضوءًا؟ مع إبقاء الكشّاف الضوئي مفتوحا، افتح حجرة البطاريات ببطء. من المحتمل أن المصباح سيصبح مظلماً. من المفترض أنك ستكون قادرا على فتح الكشّاف وغلقه بفتح وغلق حجرة البطاريات. لماذا تنجح هذه الطريقة؟
استبدل بطاريات الكشّاف الضوئي ببطاريات قديمة أو جديدة وقارن بين سطوعه. أدر واحدة أو أكثر من البطاريات عكسيا وانظر كيف أثّر ذلك على الكشّاف الضوئي. ما الذي يحدث عندما تضع قطعة من الورق أو الشريط اللاصق بين اثنتين من البطاريات؟ ما الذي يحدث عندما تنظف بعناية الأسطح المعدنية لكل بطارية بممحاة قلم رصاص قبل وضعها في الكشّاف الضوئي؟

الكهرباء والدائرة الكهربائية للكشّاف الضوئي

الكشّاف الضوئي البسيط له ثلاثة مكونات فقط- بطارية، ومصباح، ومفتاح – متصلة ببعضها بأشرطة معدنية. عندما يكون المفتاح مفتوحا، تنقل الأشرطة الطاقة من البطاريات إلى المصباح. لكن كيف تنتقل الطاقة خلال الأشرطة ولماذا يبدأ المفتاح أو يقف ذلك النقل للطاقة؟ للإجابة على هذه الأسئلة، يجب علينا أن نفهم أولا الكهرباء والدوائر الكهربائية، فسنبدأ من هناك.

عندما تفتح كشّافاً ضوئياً، تنقل الكهرباء الطاقة من البطاريات إلى المصباح. التيار الكهربائي – تيار من الشحنات الكهربائية – يتدفق خلال هذه المكونات، حاملا الطاقة معه. بالرغم من أننا سنفحص الطبيعة الدقيقة لهذا التيار قريبا، لكن يمكنك أن تتصوره كجدول مستمر من الشحنات الموجبة الصغيرة جدا والتي تتبع مساراً دائرياً يأخذها خلال البطاريات، وخلال المصباح، وبعدها عودة للبطاريات لبدء رحلة أخرى (شكل ١٠،٣،١). طالما أن الكشّاف الضوئي مفتوح، تتدفق الشحنات في هذه الحلقة،



شكل ١،٣،١٠: يحتوي الكشّاف الضوئي على بطارية واحدة أو أكثر، ومصباح ضوئي، ومفتاح، وعدة أشرطة معدنية لتوصيل هذه المكونات سوية. عند فتح المفتاح (كما هو موضح)، تُشكّل المكونات داخل الكشّاف الضوئي حلقة متصلة من المواد الموصلة. تتدفق الإلكترونات حول هذه الحلقة في اتجاه عكس عقارب الساعة.

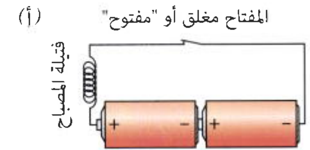
مستقبلة طاقة من البطاريات ومعطية إياها للمصباح مرة بعد أخرى. في المسار، تحمل الشحنات هذه الطاقة في الغالب على هيئة طاقة كهروستاتيكية كامنة.

يُسمّى المسار الحلقي الذي تسلكه الشحنات في الكشّاف الضوئي بالدائرة الكهربائية. بما أن الدائرة ليس لها بداية ولا نهاية، فإن الشحنات لا تستطيع أن تتجمع في مكان واحد، حيث تنافرها المتبادل سيجعلها تتوقف من التدفق في نهاية الأمر. الدوائر الكهربائية موجودة في جميع الأجهزة الكهربائية تقريباً وتفسّر الحاجة لسلكين على الأقل في سلك الكهرباء لأي أداة منزلية: سلك يحمل الشحنات إلى الأداة لتوصيل الطاقة وسلك آخر يحمل تلك الشحنات ليعيدها لشركة الكهرباء لاستقبال المزيد.

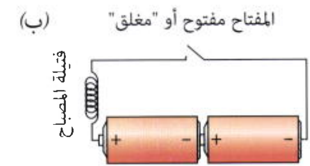
لكن ما الدور الذي يلعبه المفتاح في كل هذا الأمر؟ كجزء من مسار موصل واحد بين البطاريات والمصباح، فإن المفتاح يمكنه أن يُكمل أو يُفكك الدائرة الكهربائية للكشّاف الضوئي (شكل ٢،٣،١٠). عندما يكون الكشّاف الضوئي مفتوحا، فإن المفتاح يُكمل الحلقة بحيث يمكن للشحنات أن تتدفق باستمرار حول الدائرة الكهربائية المغلقة (شكل ٣،٣،١٠ أ). تظهر دائرة كهربائية مغلقة في الجانب الأيسر من الشكل (٣،٣،١٠).

ولكن، عندما تُغلق الكشّاف الضوئي، فإن المفتاح يُفكك الحلقة ليشكل دائرة كهربائية مفتوحة (شكل ٢،٣،١٠ ب). على الرغم من أنه مازال هناك مسار موصل واحد يصل البطاريات بالمصباح، إلا أن هناك فجوة في الحلقة الآن فلا تعود قادرة على حمل تيار مستمر. بدلا من ذلك، تتجمع الشحنات عند الفجوة ويتوقف تدفق التيار خلال الكشّاف الضوئي. بما أن الطاقة لم تعد قادرة على الوصول إلى المصباح، فإنه يصبح مظلما. تظهر دائرة كهربائية مفتوحة في الجانب الأيمن من الشكل (٣،٣،١٠).

هناك نوع آخر من الدوائر الكهربائية جدير بالذكر. تتشكّل الدائرة المقصّرة عندما يتلامس المساران المنفصلان اللذان يوصلان البطاريات بالمصباح خطأً (شكل ٤،٣،١٠). يُنشئ هذا التلامس غير المقصود حلقة جديدة أقصر تستطيع الشحنات أن تتدفق فيها. بما أنه من المفترض أن يستخلص المصباح الطاقة من الشحنات، فإنه مصمم لاعتراض تدفقها وتحويل طاقتها الكهروستاتيكية الكامنة إلى طاقة حرارية وضوء. هذه الممانعة لتدفق الكهرباء تُسمّى مقاومة كهربائية. بما أن الحلقة المقصرة توفر مقاومة قليلة فقط، فإن معظم الشحنات تتدفق خلالها وتتجنب المصباح. يخفت المصباح أو ينطفئ تماما.



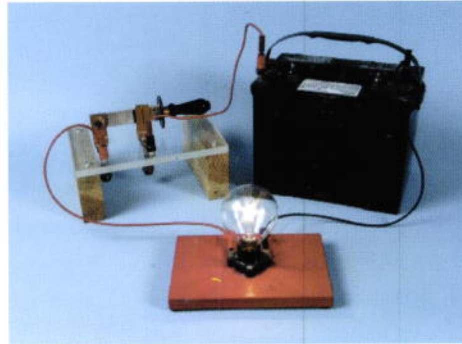
بما أن المصباح هو الجزء الوحيد من أجزاء الكشّاف الضوئي المصمم لكي يسخن، فإن الدائرة الكهربائية المقصرة تترك الشحنات دون وجود مكان آمن لها للتخلص من طاقاتها الكهروستاتيكية الكامنة. تودع الشحنات طاقتها في البطاريات والمسارات المعدنية بشكل خطر، جاعلة إياها ساخنة. بما أن الدوائر المقصرة يمكنها أن تشعل حرائق، فإن الكشّافات الضوئية والأجهزة الكهربائية الأخرى تحاول أن تتجنبها.

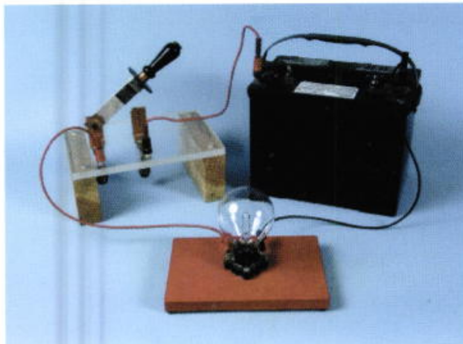


شكل ٢،٣،١٠: (أ) عندما يكون مفتاح الكشّاف الضوئي مفتوحا، فإنه يُغلق الدائرة بحيث يتمكن التيار من التدفق باستمرار من البطاريات، وخلال فتيلة المصباح، وعائدا خلال البطاريات. يتبع التيار هذه الدائرة مرة بعد أخرى. (ب) عندما يكون مفتاح الكشّاف الضوئي مغلقا، فإنه يفتح الدائرة بحيث يتوقف تدفق التيار.

شكل ٣،٣،١٠: عندما يكون المفتاح مفتوحا (يسار)، يتدفق التيار حول الدائرة المغلقة ويحمل قدرة من البطارية إلى المصباح الضوئي. ولكن عندما يكون المفتاح مغلقاً (يمين)، لا يتدفق أي تيار خلال الدائرة المفتوحة.

بإذن لو بلومفيلد





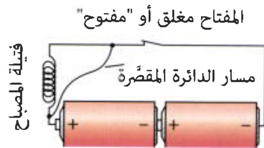
تحقق من فهمك # ١: قطع القدرة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

إذا أزلت سلكاً واحداً فقط من أسلاك بطارية سيارة، فإن السيارة لن تعمل إطلاقا. لماذا لا يوفّر السلك الآخر أي طاقة؟

التيار الكهربائي في الكشّاف الضوئي

كل من الجسيمات المشحونة الصغيرة جدا والتي تتدفق خلال دائرة الكشّاف الضوئي تحمل معها وحدة أولية واحدة فقط من الشحنة الكهربائية ومقداراً ضئيلاً من الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة. ولكن، بما أن تلك الشحنات تتدفق بأعداد هائلة، فإنها تنقل مقداراً كبيراً من الطاقة كل ثانية - الكمية التي نعرفها كقدرة (انظر قسم 2-2) ونقيسها بالواط (اختصارا W). يحتاج المصباح مقداراً معيّناً من القدرة لإبقاء فتيلته متوهجة بشكل ساطع، ويمكنك تحديد مقدار القدرة التي تصل للمصباح بضرب عدد الشحنات الأولية المارة خلال المصباح في كل ثانية بمقدار الطاقة التي توصلها كل واحدة منها.

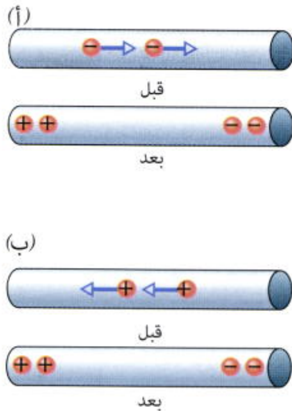


شكل ٤،٣،١٠: عندما يسمح مسار موصل غير مرغوب فيه للتيار الكهربائي بتجاهل فتيلة الكشّاف الضوئي، فإنه يُشكّل دائرة مقصّرة. بما أن الدائرة المقصرة ليس لديها مكان مناسب لكي تودع الإلكترونات طاقتها فيه، فإنها تُصبح ساخنة.

ولكن هناك الكثير من الشحنات الأولية لعدها. من الأفضل قياس تيار الدائرة الكهربائية، أي مقدار الشحنات المارة بنقطة معينة في الدائرة في كل وحدة زمن. وحدة التيار في النظام العالمي SI هي الأمبير (اختصارا A) وتقابل 1C (1كولوم) من الشحنة مارا بالنقطة المعينة في كل ثانية. 1 كولوم هو تقريباً 6.25×10^{18} أو 6,250,000,000,000,000,000 شحنة أولية، فحتى التيار الذي مقداره 1A يتضمن تدفقاً هائلاً من الشحنات الأولية.

باستخدام التيار الكهربائي بدلا من عدّ الشحنات، يمكنك تحديد مقدار القدرة الواصلة للمصباح بضرب ذلك التيار بطاقته الكهروستاتيكية لكل كولوم - الكمية التي نعرفها سابقا بالفولطية. على سبيل المثال، التيار ذو 2 أمبير (2 كولوم - لكل - ثانية) عند فولطية مقدارها 3 فولت (3 جول - لكل - كولوم) سيُعطي 6 وات من القدرة (6 جول - لكل - ثانية) للمصباح. الكشّافات الضوئية الأكثر سطوعا تتضمن تيارات أعلى، أو فولطيات أعلى، أو كلتيهما.

التيار له اتجاه يشير على طول مسار تدفق الشحنات الموجبة. عندما تفتح الكشّاف الضوئي في الشكل (١،٣،١٠)، تتدفق الشحنة حول الدائرة الكهربائية باتجاه عقارب الساعة - من الطرف الموجب لسلسلة البطارية، وخلال فتيلة المصباح، وخلال المفتاح، وإلى داخل الطرف السالب لسلسلة البطارية. ولكن حان وقت مواجهة قضية محرجة: الشحنات الموجبة التي تتدفق مع عقارب الساعة في هذه الدائرة الكهربائية هي افتراضية. في الواقع، يتم حمل التيار الكهربائي من قِبَل إلكترونات ذات شحنة سالبة متجهة في الاتجاه المعاكس!



شكل ٥،٣،١٠: لا يمكن التمييز بين تدفق تيار من جسيمات سالبة الشحنة باتجاه اليمين خلال قطعة من سلك (أ) وتدفق تيار من جسيمات موجبة الشحنة باتجاه اليسار (ب). نتيجة كلتا العمليتين هي تراكم شحنات موجبة عند طرف السلك الأيسر وتراكم شحنات سالبة عند طرفه الأيمن.

تعود هذه القضية لاختيار فرانكلين المؤسف في تسمية أي من الشحنات موجبة وأيها سالبة. خلال الزمن الذي اكتشف فيه العلماء الإلكترون وأدركوا أن هذه الجسيمات السالبة الشحنة هي التي تحمل التيار في الأسلاك، كان قد سبق أن عُرِّف التيار على أنه يتجه في اتجاه تدفق الشحنات الموجبة. بما أنه كان قد فات الأوان لجعل التيار وتدفق الإلكترونات يشيران في نفس الاتجاه، فإن العلماء والمهندسين يتمثلون أن شحنات موجبة افتراضية تحمل التيار وتتجه في اتجاه التيار.

يعمل هذا الافتراض بشكل جيد، كما هو موضح بمثال بسيط. عندما تتدفق إلكترونات سالبة الشحنة إلى اليمين خلال قطعة متعادلة كهربائياً من السلك، فإن طرف السلك الأيمن يصبح مشحوناً بشحنة سالبة وطرفه الأيسر يصبح مشحوناً بشحنة موجبة (شكل ٥،٣،١٠ أ). ولكن سيحدث نفس الشيء تماما إذا تدفق تيار من

الجسيمات الافتراضية الموجبة الشحنة إلى اليسار خلال نفس تلك القطعة من السلك (شكل ٥,٣,١٠ ب). بدون معدات احترافية، لا يمكنك تمييز ما إذا كانت الشحنات السالبة تتدفق إلى اليمين أو الشحنات الموجبة تتدفق إلى اليسار لأن النتائج النهائية هي في الأساس غير قابلة للتمييز.

نحن أيضا نتبنى هذا الافتراض ونتمثل بأن التيار هو تدفق جسيمات موجبة الشحنة. في هذا الفصل والفصول التي تليه، سنتوقف عن التفكير في الإلكترونات ونتخيّل أن الكهرباء تُحمل بواسطة شحنات موجبة تتحرك في اتجاه التيار. هناك فقط بعض الحالات الخاصة والتي فيها الإلكترونات ذاتها مهمة، وسوف ننظر في تلك الحالات بشكل منفصل عندما تظهر.

تحقق من فهمك # ٢: لا تلمس ذلك الأنبوب (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

إن السير على سجاد من الصوف بحذاء ذي نعل مطاطي قد جعلك مُغطى بالشحنات السالبة. عندما تُقرّب يدك من قطعة كبيرة من المعدن، فإن الشحنات السالبة ستقفز خلال الهواء كشرارة لكي تصل إلى المعدن. ما هو اتجاه تدفق التيار في هذه الشرارة؟

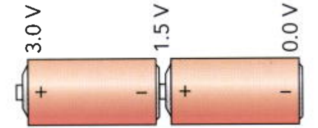
البطاريات، . . .

في حين البطارية هي أساساً مصدر متنقل للقدرة الكهربائية، إلا أن هناك طريقتين آخرتين مثيرتين للنظر إليها. الأولى هي مجردة بعض الشيء: البطارية هي نوع من المضخات. فهي «تضخّ» الشحنات من الفولطية المنخفضة إلى الفولطية المرتفعة، تماما مثل مضخة الماء التي تضخّ الماء من الارتفاعات المنخفضة إلى الارتفاعات المرتفعة. مرة أخرى، تشبيهنا الفولطية بالارتفاع مفيد. كل واحدة من هاتين المضختين تحرك شيئا ضد اتجاه تدفقه الطبيعي، وتدفعه إلى الأمام وتبذل شغلا عليه أثناء العملية. تزيد البطارية من الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة للشحنة بدفعها لأعلى تحدّر فولطي، بينما تزيد المضخة المائية من طاقة الجذب الكامنة للماء بدفعه إلى أعلى تحدّر ارتفاعي.

النظرة الأخرى للبطاريات هي أكثر ميكانيكية: البطارية هي آلة تعمل كيميائيا. تستخدم البطارية قوى كيميائية لنقل الشحنات من طرفها السالب إلى طرفها الموجب. حينما تتراكم الشحنات الموجبة عند الطرف الموجب للبطارية، ترتفع الفولطية هناك، وحينما تتراكم الشحنات السالبة عند الطرف السالب للبطارية، فإن الفولطية هناك تنخفض. بما أن البطارية تبذل شغلا في نقل الشحنات من الفولطية المنخفضة إلى الفولطية المرتفعة، فإنها تحوّل طاقتها الكيميائية الكامنة إلى طاقة كهروستاتيكية كامنة في هذه الشحنات المنفصلة.

تعكس درجة فولطية البطارية كيمياءها، بالتحديد مقدار الطاقة الكيميائية الكامنة المتوفرة لنقل كل شحنة. حينما يزيد الفرق في الفولطية بين طرفيها، كذلك تزيد الطاقة المطلوبة لنقل كل شحنة. بعد حين، لا يمكن أن تقوم المواد الكيميائية بالشغل اللازم على الشحنة لسحبها بعيدا عن الطرف السالب ودفعها إلى الطرف الموجب، فيتوقف النقل. تكون البطارية عند ذلك في حالة اتزان - القوى الكهروستاتيكية التي تعارض نقل الشحنة التالية توازن تماما القوى الكيميائية التي تشجعه. تصل البطارية القلوية المعتادة لهذا الاتزان عندما تكون فولطية طرفها الموجب 1.5V أعلى من فولطية طرفها السالب. بطاريات الليثيوم، بكيميائياتها الأكثر طاقة، يمكنها أن تصل لفروق في الفولطية مقدارها 3V أو أكثر.

عندما تفتح الكشّاف الضوئي، فأنت تزعج توازنه بالسماح للشحنات بمغادرة طرف البطارية الموجب إلى طرفها السالب. بوجود شحنات منفصلة أقل على طرفي البطارية، فإن الفرق في فولطية البطارية يتناقص بشكل طفيف وتبدأ بضخ الشحنات مرة أخرى. ذلك الانتقال الجديد للشحنات يسد النقص في الشحنات المنفصلة عند الطرفين ويعارض المزيد من النقص في فولطية البطارية. بهذه الطريقة، تحافظ البطارية القلوية ذات 1.5V على فرق فولطية ثابت تقريبا مقداره 1.5V بين طرفيها، سواء كان الكشّاف الضوئي مفتوحا أو مغلقا.



شكل ٦,٣,١٠: عندما تتصل بطاريتان ذات 1.5V في سلسلة، فإن فولطياتهما تتجمع بحيث يكون للطرف الموجب للسلسلة فولطية 3V أعلى من الطرف السالب للسلسلة. إذا تم اختيار الطرف السالب للسلسلة ليكون عند 0V، فإن الطرف الموجب للسلسلة سيكون عند 3V.

تلك البطارية القلوية تعمل بواسطة تفاعل كهروكيميائي حيث يتفاعل مسحوق من الزنك عند طرفها السالب مع معجون ثاني أكسيد المنجنيز عند طرفها الموجب. هذا التفاعل يُشابه الاحتراق المحْكم. في الحقيقة، «تحرق» البطارية الزنك لتحصل على الطاقة التي تحتاجها لضخ الشحنات من طرفها السالب إلى طرفها الموجب. لكن حينما تستهلك البطارية طاقتها الكيميائية الكامنة، فإن قدرتها على ضخ الشحنات تقل. عندما تكاد تنفد موادها الكيميائية، فإن تزايد اضطراب البطارية يقلل من فولطيتها. تضخ البطارية القديمة تياراً أقل من البطارية الجديدة وتوفّر ذلك التيار بفولطية أقل. في النهاية، تصل قدرة أقل لمصباح الكشّاف الضوئي وبالتالي يخفت.

تستخدم معظم الكشّافات الضوئية أكثر من بطارية واحدة. عندما تتصل بطاريتان قلويتان سوية في سلسلة، بحيث يلمس الطرف الموجب للبطارية الأولى الطرف السالب للبطارية الثانية، فإن البطاريتين تعملان سوية لضخ الشحنات من الطرف السالب للسلسلة إلى طرفها الموجب (شكل ٦,٣,١٠). كل بطارية تضخ الشحنات إلى أن يصبح طرفها الموجب 1.5V أعلى من طرفها السالب، لذا فإن الطرف الموجب للسلسلة هو 3V أعلى من طرفها السالب. بما أن الشحنات لا تغادر الدائرة الكهربائية للكشاف الضوئي، فإن الفولطيات النسبية فقط هي المهمة في تلك الدائرة. سنجد أنه من المناسب إهمال القيمة المطلقة لفولطية الكشّاف الضوئي وتعريف فولطية الطرف السالب لسلسلة البطاريات بأنها 0V (شكل ٦,٣,١٠). بهذا الاختيار، تصبح فولطية طرفها الموجب 3V.

كلما زاد عدد البطاريات في سلسلة الكشّاف الضوئي، زادت الطاقة التي تتلقاها الشحنة إجمالا وزادت الفولطية من الطرف السالب للسلسلة إلى طرفها الموجب. الكشّاف الضوئي الذي يستخدم ست بطاريات قلوية في سلسلته له طرف موجب فولطيته 9V أعلى من طرفه السالب. البطارية ذات 9V الاعتيادية تحتوي في الحقيقة على سلسلة من ست بطاريات صغيرة كل منها 1.5V، مرتبة بحيث تتجمع فولطيتها لتصل إلى 9V (شكل ٧,٣,١٠).

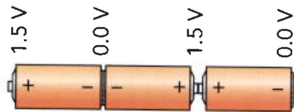
إذا عكست إحدى البطاريات في السلسلة، فإن البطارية المعكوسة ستستخلص طاقة من أي شحنة تمر بها (شكل ٨,٣,١٠). في حين لن تزال السلسلة تضخ شحنة من طرفها السالب إلى طرفها الموجب، إلا أن إجمالي فولطيتها سيقل لأنه بدلا من إضافة 1.5V لإجمالي فولطية السلسلة، فإن البطارية المعكوسة ستطرح ذلك المقدار. إذا كان للسلسلة ثلاث بطاريات، فإن اثنتين ستضيف طاقة للشحنة بينما واحدة ستنقصها وستصبح الفولطية الإجمالية للسلسلة 1.5V فقط.

حينما تنتزع البطارية المعكوسة طاقة من الشحنات المارة خلالها، فإن بعضاً من تلك الطاقة المنتزعة على الأقل تتحوّل إلى طاقة كيميائية كامنة. البطارية المعكوسة يُعاد شحنها! شاحنات البطاريات تتبع ذلك المبدأ، بدفع التيار عكسيا خلال بطارية – من طرفها الموجب إلى طرفها السالب – لإعادة الطاقة الكيميائية الكامنة في البطارية القابلة لإعادة الشحن. ولكن البطاريات القلوية المعتادة «غير قابلة لإعادة الشحن»، أي أنها تحوّل معظم طاقة تيار إعادة الشحن إلى طاقة حرارية بدلا من طاقة كيميائية كامنة. البطاريات غير القابلة لإعادة الشحن قد تسخن وتنفجر أثناء إعادة الشحن.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٧,٣,١٠: في الحقيقة تحتوي بطارية 9V على ست خلايا صغيرة كل منها 1.5V، متصلة ببعضها في سلسلة. الشحنات الموجبة التي تدخل السلسلة عند الطرف السالب للبطارية تمر خلال كل الخلايا الست قبل أن تصل لطرف البطارية الموجب.



شكل ٨,٣,١٠: عند عكس بطارية في سلسلة من ثلاث بطاريات، فإن فولطية البطارية المعكوسة تُطرح من مجموع الأخريات. الطرف الموجب للسلسلة له فولطية 1.5V فقط أعلى من طرفها السالب. يُعاد شحن البطارية المعكوسة.

تحقق من فهمك # ٣: بطاريات السيارة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

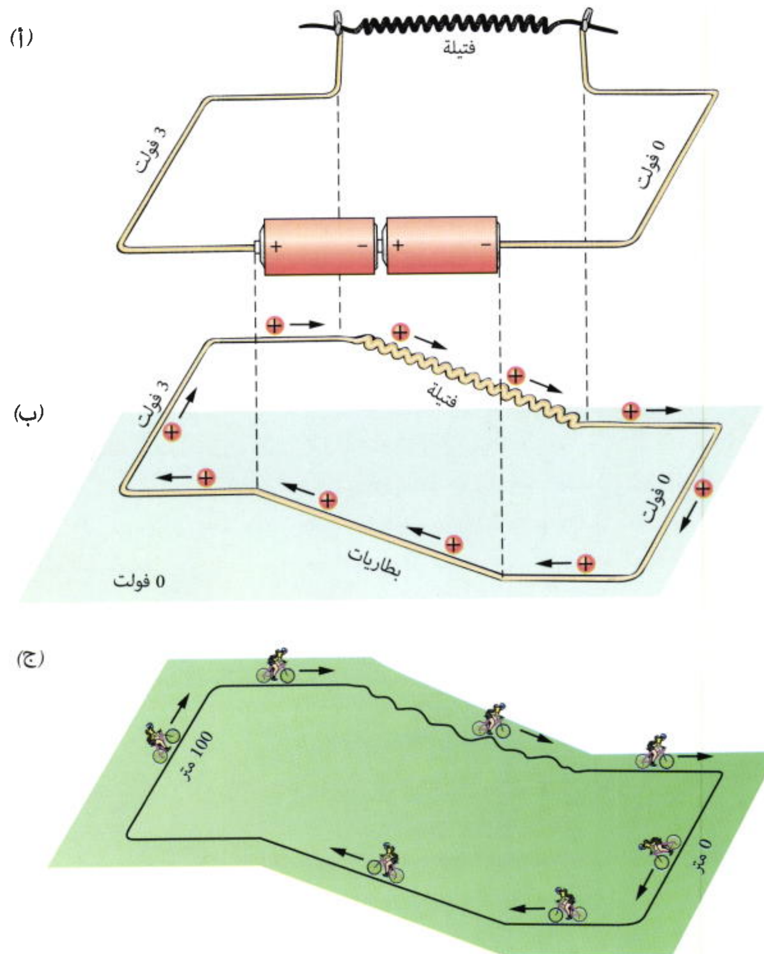
توفر بطارية الرصاص في السيارة 12V بين طرفها السالب وطرفها الموجب. في الواقع تحتوي البطارية على ست بطاريات فردية، متصلة في سلسلة. ما مقدار الفولطية التي توفرها كل بطارية على حدة؟

. . . والمصابيح، والأشرطة المعدنية

في حين تُعطي البطارية الشحنات طاقة كهروستاتيكية كامنة بدفعها أعلى تحدّر فولطي، إلا أن المصباح يحرر تلك الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة بالسماح للشحنات بالانزلاق لأسفل تحدّر فولطي آخر. هاتان الأداتان تصنع زوجاً مثالياً: توفر البطارية القدرة الكهربائية والمصباح يستهلكها. لقد رأينا سابقا في الفصل السابع أن المصباح يستخدم هذه القدرة لتسخين فتيلة التنجستن لكي تتوهج، وبالتالي منتجة ضوءاً. الآن حان وقت النظر في كيفية تسخين الكهرباء للفتيلة.

سوف ننظر في كشّاف ضوئي ذي بطاريتين قلويتين (شكل ٩,٣,١٠ أ). فتيلة المصباح هي سلك رقيق وطرفاها موصلان كهربائيا بطرفي سلسلة البطاريات. مع كون أحد طرفيها عند 3V والآخر عند 0V، فإن الفتيلة لها تحدّر فولطي خلالها وبالتالي مجال كهربائي. لكن كيف يكون هذا ممكنا؟ حينما ناقشنا الآلات الناسخة، لاحظنا أن الموصل له فولطية منتظمة خلاله. أليست الفتيلة تناقض هذه القاعدة؟

لا. في حين يكون للموصل فولطية منتظمة عندما تكون شحناته في وضع اتزان، فإن الشحنات في المصباح تكون فقط في حالة اتزان عندما يكون الكشّاف الضوئي مغلقاً. عندما تفتح الكشّاف الضوئي، فأنت تفرض فرق فولطية مقداره 3V بين



شــكل ٩,٣,١٠: (أ) ينقل التيار في الدائرة الكهربائية للكشّــاف الضوئي قدرة من البطاريات إلى الفتيلة. (ب) ترتفع الفولطية في البطاريات وتتناقص في الفتيلة. بالرغم من وجود مجال كهربائي داخل الفتيلة، والذي يدفع الشحنات إلى الأمام، إلا أنها تسير بسرعة ثابتة بسبب الاصطدامات. (ج) هذا السلوك يُشابه راكب دراجة يصعد بدراجته لأعلى هضبة مستوية ثم يتدحرج أسفل هضبة وعرة بسرعة ثابتة.

طرفي الفتيلة وتبدأ شحنات الفتيلة فورا بالتسارع أسفل التحدّر الفولطي باتجاه الطرف ذي 0V.

في تشبيهنا الفولطية بالارتفاع، تكون الحالة كما لو أنك فجأة أملت حقلاً مستوياً لكي تكوّن هضبة، والماء الذي كان ساكناً بلا حراك على ذلك الحقل يتسارع الآن لأسفل الهضبة. ولكن تشبيهاً أفضل للشحنات الفردية التي ننظر إليها الآن سيكون كراكبي دراجات: تصوّر مئات من راكبي الدراجات على حقل مستوٍ والذي يميل فجأة ليكوّن هضبة. جميع راكبي الدراجات الذين كانوا في وضع اتزان على الحقل المستوي يتسارعون الآن لأسفل الهضبة.

إذا كانت الفتيلة موصلاً تاماً للكهرباء، فإن كل شحنة ستتسارع بثبات لأسفل التحدّر الفولطي وتحوّل طاقتها الكهروستاتيكية الكامنة إلى طاقة حركية. ولكن الفتيلة لها مقاومة كهربائية كبيرة وتعيق بشكل كبير تدفق التيار الكهربائي. تتصادم كل شحنة أثناء سيرها لأسفل التحدّر الفولطي، مصطدمة مراراً بذرات فتيلة التنجستن ومتخلية عن طاقة حركية مع كل اصطدام (شكل 9.3.10 ب). الشيء الذي بدأ كطاقة كهروستاتيكية كامنة منظمة في الشحنات أصبح طاقة حرارية في ذرات التنجستن، فتتوهج الفتيلة بشكل ساطع. بالإشارة مرة أخرى لتشبيهنا الفولطية بالارتفاع، تصوّر راكبي الدراجات يسيرون أسفل هضبة وعرة مليئة بالصخور والأشجار المتناثرة (شكل ٩,٣,١٠ ج). يكتسب راكبو الدراجات كدمات بدلا من سرعة.

ماذا عن الأشرطة المعدنية التي توصل بطاريات الكشّاف الضوئي بالمصباح؟ هذه الموصلات السميكة لها مقاومات كهربائية صغيرة وتحمل التيار بسهولة. تخرج الشحنات من الأشرطة بنفس الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة تقريباً التي كانت لديها عند دخولها إليها، لذا فإن الفولطيات عند طرفي ذلك الشريط تقريبا متساوية. في العموم، كلما قلت المقاومة الكهربائية في الأسلاك التي تحمل التيار من وإلى المصباح، قلت القدرة المهدرة في الطريق وزادت القدرة التي تصل المصباح. لهذا من المهم استخدام أشرطة معدنية سميكة أو حتى الغلاف المعدني للكشّاف الضوئي في التوصيل.

لكن توصيلاً رديئاً في أي مكان في الدائرة الكهربائية يمكنه أن يُفسد هذا الانتقال للقدرة ذي الكفاءة العالية. إذا كان هناك تراب أو زيت على طرف البطارية أو مواد بالية في المفتاح، فإن على التيار أن يمر خلال مقاومة كهربائية عالية ويهدر القدرة. إن تحسين ذلك الاتصال، إما بهز الكشّاف الضوئي أو تنظيف الأسطح المعدنية، سيزيد من تدفق التيار خلال الدائرة الكهربائية، ويقلل من القدرة المهدرة، ويزيد من سطوع الكشّاف الضوئي.

تحقق من فهمك # ٤: تحصل على قدر ما تدفع (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

البطارية في سيارتك ميتة، فتستخدم أسلاك تنشيط رخيصة الثمن لتوصيل النظام الكهربائي في سيارتك بالنظام الكهربائي في سيارة صديقك. ولكن عندما تحاول أن تُشغّل سيارتك، فإن قدرة قليلة تصل إليها غير كافية لتشغيل محركها. ما المشكلة في هذه الأسلاك؟

الفولطية، والتيار، والقدرة في الكشّافات الضوئية

عندما تفتح كشّافاً ضوئياً، يحمل تيار كهربائي قدرة من بطاريتيه القلويتين إلى مصباحه. دعنا نفترض أن تياراً مقداره 1A يتدفق خلال الدائرة الكهربائية للكشّاف الضوئي ولننظر ما مقدار القدرة التي يتم نقلها.
يستهلك المصباح قدرة كهربائية لأن التيار المار خلاله ينزلق لأسفل التحدّر الفولطي ويواجه انخفاضاً في الفولطية إجمالا. هذا الهبوط الفولطي يقيس الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي تفقدها كل وحدة شحنة أثناء معاناتها حينما تمر خلال الفتيلة.
إن ضرب الهبوط الفولطي بالتيار المار خلال المصباح يُعطيك القدرة المستهلكة من قبل المصباح. هذه الملاحظة يمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

القدرة المستهلكة = الهبوط الفولطي × التيار (١,٣,١٠)

ورمزيا:

$$P = V \cdot I$$

وفي لغة الحياة اليومية: عندما يفقد تيار كبير الكثير من الفولطية، فمن المحتمل أن شيئا ما سيسخن.

بما أن الهبوط الفولطي عبر المصباح هو 3V والتيار المار خلاله هو 1، فإنه يستهلك 3W من القدرة.

تنتج سلسلة بطاريات قدرة كهربائية لأن التيار المار خلالها يُدفع لأعلى تحدّر فولطي ويواجه ارتفاعاً إجمالياً في الفولطية. هذا الارتفاع الفولطي يقيس الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي تكتسبها كل وحدة شحنة بينما تُضخ خلال البطاريات. إن ضرب الفولطية المكتسبة بالتيار المار خلال البطاريات يُعطيك القدرة التي توفرها البطاريات. هذه الملاحظة يمكن كتابتها كمعادلة لفظية:

القدرة المكتسبة = الارتفاع الفولطي × التيار (٢،٣،١٠)

ورمزيا:

$$P = V \cdot I$$

وبلغة الحياة اليومية: يتطلب رفع فولطية تيار كهربائي كبير مقداراً كبيراً من القدرة.

بما أن الارتفاع الفولطي عبر السلسلة هو 3V والتيار المار خلالها هو 1A، فإنها توفّر 3W من القدرة.

تحقق من فهمك # ٥: اتجاهات التيار في الموسيقى (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

تقوم بطارية كبيرة بتشغيل مِذياعك المتنقل. يدخل التيار للمذياع خلال سلك ويغادر خلال آخر. أي السلكين له فولطية أعلى؟

دقق في أرقامك # ١: عندما تدير مفتاح الإشعال (للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

عندما تبدأ بتشغيل سيارتك، فإنه يصعب تشغيل محركها البارد ويقوم تيار مقداره 200A بالتدفق خلال محرك تشغيلها المبدئي. إذا واجه ذلك التيار هبوطاً فولطياً مقداره 12V، فما مقدار القدرة المستهلكة؟

دقق في أرقامك #٢: عندما تدير مفتاح الإشعال مرة أخرى (للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

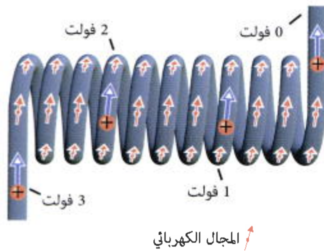
عندما تعيد تشغيل السيارة، من السهل إدارة محركها الدافئ ويتدفق تيار أقل مقداره 150A خلال محرك تشغيل السيارة المبدئي. توفّر البطارية قدرة لهذا التيار، موفرة له ارتفاعاً فولطياً مقداره 12V. ما مقدار القدرة التي توفرها البطارية؟

اختيار المصباح: قانون أوم

إن مصباح كشّافنا الضوئي مُصمَّم لكي يعمل بشكل جيد عند هبوط فولطي مقداره 3V. بتعرضه لذلك الهبوط الفولطي، فإن المصباح سيحمل تياراً مقداره 1A وبالتالي يستهلك 3W من القدرة الكهربائية: ما يكفي لجعله يتوهج بشكل جيد.

إذا كنت ستستخدم المصباح الخاطئ في هذا الكشّاف الضوئي، أي مصباح مصمم للعمل عند هبوط فولطي مختلف، فإن فتيلته ستحمل المقدار الخاطئ من التيار وتستقبل المقدار الخاطئ من القدرة. القدرة الزائدة ستحرق الفتيلة بسرعة بينما القدرة الأقل ستجعل الفتيلة تتوهج بخفوت.

من الواضح أن فتيلة المصباح يجب أن تناسب الكشّاف الضوئي، خصوصا فولطية سلسلة بطاريات الكشّاف الضوئي. على سبيل المثال، تتطلب الكشّافات الضوئية التي تستخدم العديد من البطاريات فتائل مصباح مصممة للعمل بهبوطات فولطية كبيرة. ولكن لماذا يكون التيار المحمول من قِبل فتيلة مصباح معيّنة مرتبطاً بالهبوط الفولطي عبرها ولماذا تستجيب المصابيح المختلفة بشكل مختلف لهبوط فولطي معيّن؟



شكل ١٠,٣,١٠: تواجه الشحنات المتحركة خلال هذه الفتيلة هبوطاً فولطياً مقداره 3V وتُدفع إلى الأمام من قِبل المجال الكهربائي الناتج. تحافظ الشحنات على سرعة ثابتة بالرغم من التصادمات المتكررة مع ذرات التنجستن.

العلاقة بين التيار والهبوط الفولطي هي نتيجة التصادمات. تتوقف الشحنات فعليا كلما اصطدمت بذرات التنجستن، لذا تحتاج الشحنات دفعة من المجال الكهربائي لإبقائها متحركة إلى الأمام (شكل ١٠,٣,١٠). مضاعفة ذلك المجال الكهربائي سيضاعف السرعة المتوسطة لكل شحنة، ولأن عدد الشحنات المتحركة في الفتيلة ثابت، فإن ذلك سيضاعف التيار الإجمالي المتدفق خلال الفتيلة. بما أن المجال الكهربائي الذي يدفع هذا التيار هو التحدّر الفولطي للفتيلة، فإن مضاعفة الهبوط الفولطي خلال الفتيلة سيضاعف التيار أيضا. في تشبيهنا الفولطية بالارتفاع، تصور راكبي دراجات يسيرون على أرض وعرة صخرية دون تحريك الدواسات. هؤلاء الركّاب الكسالى يتوقفون فعليا كلما اصطدموا بالصخور، لذا يحتاجون لدفع المنحدر لإبقائهم متحركين إلى الأمام. إن مضاعفة ميل تحدّر الارتفاع - الانخفاض في الارتفاع لكل متر من السير للأسفل - سيضاعف السرعة المتوسطة لكل راكب دراجة، ولأن عدد راكبي الدراجات الذي يمكن أن تستوعبه الهضبة ثابت، فإن ذلك سيضاعف أيضا التيار الإجمالي من راكبي الدراجات المتدحرجين لأسفل الهضبة. بما أن المنحدر الذي يدفع هذا التيار من راكبي الدراجات هو تحدّر ارتفاع الهضبة، فإن مضاعفة ارتفاع الهضبة يضاعف تيار راكبي الدراجات أيضا.

إن تأثير اختيار الفتيلة على تدفق التيار يعكس المقاومات الكهربائية المختلفة لتلك الفتائل. أي شيء يزيد من عدد الشحنات الكهربائية الحرة عبر عرض الفتيلة أو يسمح لتلك الشحنات بالمحافظة على سرعة متوسطة أعلى عند هبوط فولطي معيّن سيقلل من المقاومة الكهربائية للفتيلة ويزيد من تدفق التيار خلالها. في الحقيقة، تُعرّف المقاومة الكهربائية على أنها الهبوط الفولطي خلال الفتيلة مقسوما على التيار الذي ينشأ نتيجة لذلك. إن جعل الفتيلة أكثر سمكا أو أقصر طولا سيقلل من مقاومتها، وكذلك تغيير مكوناتها لجعل التصادمات أقل تكرارا.

إن تشبيهنا الفولطية بالارتفاع مع راكبي الدراجات على هضبة مفيد مرة أخرى. أي شيء يزيد من عدد راكبي الدراجات عبر عرض الهضبة أو يسمح لراكبي الدراجات بالمحافظة على سرعة متوسطة أعلى في هضبة ذات ارتفاع معين سيقلل من «مقاومة راكبي الدراجات» في تلك الهضبة ويزيد من تيار راكبي الدراجات المتدحرجين لأسفلها. في الحقيقة، تُعرّف «مقاومة راكبي الدراجات» على أنها ارتفاع الهضبة مقسوما على تيار الركاب الذي أحدثه. إن جعل الهضبة أكثر عرضا أو أقصر طولا سيقلل من مقاومة راكبي الدراجات، وكذلك تغيير صخريتها لجعل التصادمات أقل تكرارا.

بدمج هذه الملاحظات، نرى أن التيار المتدفق خلال الفتيلة يتناسب مع الهبوط الفولطي خلالها ويتناسب عكسيا مع المقاومة الكهربائية للفتيلة، والذي يمكن أن يُكتب: (٣,٣,١٠)

$$\text{التيار} = \frac{\text{الهبوط الفولطي}}{\text{المقاومة الكهربائية}}$$

تُسمّى هذه العلاقة قانون أوم، نسبة لمكتشفه جورج سيمون أوم (انظر◊°). . بترتيب القانون بهذه الطريقة يُفصل المسببات (الهبوط الفولطي والمقاومة الكهربائية) من نتيجتها (تدفق التيار). لكن هذه المعادلة في الغالب يُعاد ترتيبها للتخلص من القسمة. عندها تأخذ العلاقة شكلها المألوف، والذي يمكن أن يُكتب كمعادلة لفظية:(٤,٣,١٠)

$$\text{الهبوط الفولطي} = \text{التيار} \times \text{المقاومة الكهربائية}$$

◊° خدم الفيزيائي الألماني جورج سيمون أوم (١٧٨٧-١٨٥٤م) كأستاذ رياضيات، أولا في كلية اليسوع في مدينة كولون وبعدها في مدرسة التقنيات في نورمبرغ. إن مؤلفاته العديدة لم تكن متميزة، عدا كتيب واحد عن العلاقة بين التيار والفولطية. هذا المستند المتميز، المكتوب في عام ١٨٢٧م، تم تجاهله في بادئ الأمر من قبل الفيزيائيين، حتى وإن كان مستندا على أدلة معملية جيدة وفسّر مشاهدات الآخرين السابقة. استقال أوم من منصبه في جامعة كولون، ولم يتم قبول عمله إلا حوالي عام ١٨٤٠م. أخيرا تم تعيينه كأستاذ فيزياء في جامعة ميونخ فقط عامين قبل وفاته.

ورمزيا:

$$P = V . I$$

وفي لغة الحياة اليومية: تخسر أسلاك التنشيط الطويلة والرفيعة كثيراً من الفولطية بحملها التيار إلى سيارتك بحيث يزداد احتمال عدم بدء تشغيلها.

الوحدة في النظام العالمي SI للمقاومة الكهربائية، الفولت-لكل-أمبير، تسمى أوم (اختصارا Ω، الحرف اليوناني أوميغا). بالرغم من بساطته، إلا أن قانون أوم مفيد جدا في الفيزياء والهندسة الكهربائية. ينطبق قانون أوم على العديد من الأنظمة حيث أنه يمكن وصف كل شيء تقريباً بمقاومة كهربائية. بمجرد معرفة المقاومة الكهربائية لجسم، فإن التيار المتدفق خلالها يمكن حسابه من هبوطه الفولطي أو يمكن حساب هبوطه الفولطي من التيار المتدفق خلالها. في الغالب يُوصف الجسم الذي يُحقق قانون أوم بالأومي.

قانون أوم

الهبوط الفولطي خلال سلك يساوي التيار المتدفق خلال ذلك السلك مضروبا في المقاومة الكهربائية للسلك.

أخيرا، تكون المقاومة الكهربائية لجسم معتمدة على درجة الحرارة في العادة. إن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من عدد الشحنات المتحركة في الجسم ولكن أيضا يجعلها تتصادم بشكل أكثر تكرارا مع الذرات المهتزة. إذا سيطرت وتيرة التصادمات المتزايدة، كما هو الحال في المعادن، فإن مقاومة الجسم تزداد مع درجة الحرارة. على سبيل المثال، تحمل الفتيلة تيارا أقل عند اقترابها من درجة حرارة التشغيل، وهو سلوك يساعدها على تجنب التسخين الزائد. ولكن إذا سيطرت الزيادة في عدد الشحنات الحرة، كما هو الحال في أشباه الموصلات، فإن مقاومة الجسم تقل بزيادة درجة الحرارة. هذا يُفسّر لماذا تحمل رقائق الكمبيوتر المعتمدة على أشباه الموصلات تيارا أكبر عندما تسخن وتتحطم ذاتيا عند التسخين المفرط.

تحقق من فهمك # ٦: حماية الجلد (للإجابة، انظر صفحة ٣٢٨)

لجلدك مقاومة كهربائية أكبر بكثير من أنسجتك. إذا لمست طرفي بطارية بأصابعك، فأين يكون الهبوط الفولطي الأكبر – في جلدك أم في أنسجتك؟

دقق في أرقامك # ٣: مقاومة خفيفة (للإجابة، انظر صفحة ٣٣٠)

كشّافان ضوئيان بقدرة 3 W لهما مقاومتان مختلفتان: 3Ω و 12Ω. أي المصباحين صُمم ليعمل ببطاريتين قلويتين كل منهما 1.5V؟

خاتمة الفصل العاشر

تطرق هذا الفصل لثلاث طرق تلعب فيها الشحنة والكهرباء أدواراً مهمة. في قسم الكهرباء الساكنة، قدمنا مفهوم الشحنة الكهربائية وناقشنا القوى التجاذبية والتنافرية التي تبذلها الأجسام المشحونة على بعضها البعض. كما درسنا الطاقات الكهروستاتيكية الكامنة المختزنة في قوى الشحنات تلك والعلاقة بين هذه الطاقة والفولطيات عند مواقع مختلفة. تعلمنا كيف تكتسب الأجسام المختلفة شحنات إجمالية من خلال الالتماس وكيف يمكن أن تنتج الفولطيات العالية من فصل كميات كبيرة من الشحنات المتعاكسة.

في قسم آلات الزيروغراف الناسخة، درسنا المجالات الكهربائية ورأينا كيف أن تلك المجالات يمكن استخدامها لتحريك الشحنات من مكان لآخر. فحصنا التفريغات الهالية التي تتكوّن في المجالات الكهربائية القوية حول الحواف الحادة أو الأسلاك الرقيقة عند الفولطيات المرتفعة. ورأينا كيف يمكن لوضع شحنة على جسم أن يحث شحنة معاكسة على جسم آخر قريب موصل بالأرض.

في قسم الكشّافات الضوئية، فحصنا الدوائر الكهربائية لرؤية كيف يمكن لتيار من الشحنات الكهربائية أن ينقل القدرة من البطاريات إلى المصباح الضوئي. وجدنا أن كلاً من الفولطية والتيار تساهم في نقل القدرة وتعلمنا كيف أن المقاومة الكهربائية للمصباح تتحكم في القدرة التي يستهلكها.

تفسير: تحريك الماء دون لمسه

تستخدم هذه التجربة التلامس بين المواد المختلفة لإعطاء المشط محصلة شحنة كهربائية. تنتقل الإلكترونات من شعرك إلى المشط، تاركة شعرك مشحوناً بشحنة موجبة والمشط مشحوناً بشحنة سالبة. بما أن المشط عازل كهربائي، فإن شحنته السالبة تظل محبوسة على سطحه لفترة طويلة من الزمن.

حينما تمسك بالمشط المشحون بشحنة سالبة بالقرب من تيار الماء، فإن المشط يجذب الشحنات الموجبة الموجودة في الماء ويتنافر مع الشحنات السالبة. بسبب أن الماء يوصل الكهرباء بعض الشيء، فإن الشحنات الموجبة يمكنها أن تسير لأسفل تيار الماء من الصنبور بينما الشحنات السالبة تسير في الاتجاه الآخر. وهكذا يكتسب الماء محصلة شحنة موجبة في وجود المشط المشحون بشحنة سالبة، وهو مثال للشحن بالتأثير. بما أن الماء والمشط المشحونين بشحنات متعاكسة يجذبان بعضهما البعض، فإن الماء يتسارع باتجاه المشط فيتقوّس جانبا أثناء سقوطه.

ملخص الفصل

كيفية عمل الكهرباء الساكنة

عندما تتهاوى الملابس في مجففة الملابس، فإن التلامس بين الأقمشة المختلفة ينقل الإلكترونات ذات الشحنة السالبة من لباس لآخر. نتيجة لهذا التلامس الشاحن، فإن الملابس المختلفة تكتسب محصلة شحنة، بعضها موجب والبعض الآخر سالب. عندما تُفصل الملابس فيما بعد، يصبح الشغل المبذول في سحبها عن بعض طاقة كهروستاتيكية كامنة وتكوّن الملابس فولطية عالية. يمكن أن تتكوّن فولطية عالية أيضاً عندما تمشي عبر سجاد أو تقود سيارتك على طول الطريق. بما أن الفولطيات العالية تميل لدفع الشحنات إلى الهواء كتسريبات أو شرارات، فإن الشحن الساكن يمكن أن يكون مزعجا. يمكنك التحكم به بمساعدة مواد موصلة: فالسماح للشحنة بالتحرك بشكل تلقائي من الفولطية العالية إلى الفولطية المنخفضة يمنع تجمّع كميات كبيرة من الشحنات المنفصلة بحيث لا يمكن أن تتكوّن فولطيات عالية.

كيفية عمل آلات الزيروغراف الناسخة

يسمح الموصل الضوئي في آلة الزيروغراف الناسخة للضوء بالتحكم بتوزيع الشحنة الكهربائية على سطحه. هذا الموصل الضوئي يُغطى مبدئيا بشحنات بشكل منتظم وذلك بتمريره بالقرب من تفريغ هالي. عندما تُسقط صورة ضوئية من المستند الأصلي على هذا الموصل الضوئي المشحون. أينما اصطدم الضوء بالموصل الضوئي، تهرب الشحنة السطحية. النتيجة هي صورة مشحونة على الموصل الضوئي. يتم تقريب جسيمات الحبر السوداء الصغيرة جدا، والمشحونة بشحنة معاكسة للأجزاء غير المضاءة في الموصل الضوئي، من الصورة المشحونة. تلتصق جسيمات الحبر هذه بالأجزاء المشحونة على الموصل الضوئي، مكوّنة صورة مرئية من المستند. بعد ذلك يتم نقل جسيمات الحبر هذه إلى ورقة وتُصهر عليها لتكوّن النسخة النهائية.

كيفية عمل الكشّافات الضوئية

يُنتج الكشاف الضوئي ضوءا عندما يتدفق تيار خلال دائرته الكهربائية. تتكون هذه الدائرة من سلسلة من البطاريات، ومصباح ضوئي، ومفتاح، والعديد من الأشرطة المعدنية، جميعها متصلة في حلقة مستمرة. يتحصّل التيار على قدرة حينما يمر خلال

البطارية، ويحرر هذه القدرة حينما يمر خلال فتيلة المصباح الضوئي، فيسخّن تلك الفتيلة إلى أن تصبح بيضاء ساخنة. يوفّر المفتاح طريقة للتحكم في تدفق التيار في الدائرة. عندما يكون المفتاح مغلقا، فإنه يكسر الدائرة ويمنع التيار من التدفق بالكامل حول الدائرة. بدون تيار مستمر لحمل القدرة من البطاريات إلى المصباح، فإن المصباح يكون مظلماً. عندما يكون المفتاح مفتوحا، فإنه يُكمل الدائرة الكهربائية بحيث يمكن للقدرة أن تصل المصباح فيُضيء المصباح.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون كولوم: إن مقادير القوى الكهروستاتيكية بين جسمين تساوي ثابت كولوم مضروبا في حاصل ضرب شحنتيهما الكهربائيتين مقسومة على مربع المسافة التي تفصل بينهما، أو:

$$\text{القوة} = \frac{\text{ثابت كولوم} \times \text{شحنة}_1 \cdot \text{شحنة}_2}{(\text{المسافة بين الشحنات})^2} \qquad (١,١,١٠)$$

إذا كانت الشحنتان متشابهتين، فالقوى تنافرية. إذا كانت الشحنتان متعاكستين، فالقوى تجاذبية.

٢. القوة المبذولة على شحنة من قِبل مجال كهربائي: تواجه الشحنة قوة تساوي حاصل ضرب شحنتها بالمجال الكهربائي، أو (١,٢,١٠)

القوة = الشحنة × المجال الكهربائي

حيث تشير القوة في اتجاه المجال الكهربائي.

٣. المجال الكهربائي بسبب الهبوط الفولطي: ينتج الهبوط الفولطي مجالا كهربائيا مساوياً لذلك الهبوط الفولطي مقسوما على المسافة التي يحدث فيها الهبوط، أو

$$\text{المجال كهربائي} = \text{التحذر الفولطي} = \frac{\text{هبوط الفولطية}}{\text{المسافة}} \qquad (٢,٢,١٠)$$

حيث يشير المجال الكهربائي في اتجاه انخفاض الفولطية الأسرع.

٤. استهلاك القدرة: القدرة الكهربائية المستهلكة من قِبل جهاز هي الهبوط الفولطي عبره مضروبا في التيار المتدفق خلاله، أو

القدرة المستهلكة = الهبوط الفولطي × التيار (١,٣,١٠)

٥. إنتاج القدرة: القدرة الكهربائية المتوفرة من قِبل جهاز هي الارتفاع الفولطي عبره مضروبا في التيار المتدفق خلاله، أو

القدرة المكتسبة = الارتفاع الفولطي × التيار (٢,٣,١٠)

٦. قانون أوم: الهبوط الفولطي خلال جسم أومي يساوي التيار المتدفق خلاله مضروبا في مقاومته الكهربائية، أو

الهبوط الفولطي = التيار × المقاومة الكهربائية (٤,٣,١٠)

هذه المعادلة لا تنطبق على الأجسام غير الأومية.

تحقق من فهمك - الإجابات

١٠-١ الكهرباء الساكنة

١. لها شحنة موجبة كبيرة مساوية في المقدار لشحنة غلاف الهدية السالبة.

لماذا: بما أن الشحنة هي كمية فيزيائية محفوظة، فإن الغلاف والهدية يجب أن يظلا متعادلين كهربائيا كلية حتى بعد فصلك إياهما. يجب أن تتوازن الشحنة السالبة للغلاف بالشحنة الموجبة للهدية.

٢. الشحنة السالبة للغلاف تجعل يدك مستقطبة وبعدها تنجذب لشحنة يدك الموجبة القريبة.

لماذا: بالرغم من أن يدك متعادلة كهربائيا، إلا أنه يُعاد ترتيب شحناتها استجابة للشحنة السالبة للغلاف القريب من يدك. تنزاح الشحنة الموجبة في يدك باتجاه الغلاف وتجذبها.

٣. حينما كان الشريط اللاصق والزجاج متلامسين، فإن الشحنة لم تكن موزعة بالتساوي بين سطحيهما. إزالة الشريط اللاصق جعلت عدم التوازن هذا أكثر وضوحا فحسب.

لماذا: للشريط اللاصق والزجاج ألفة كيميائية مختلفة للإلكترونات فيصبحان مشحونين بشحنات متعاكسة كلما تلامسا. في الحقيقة، يعود التصاق الشريط ذاته إلى التجاذب الكهروستاتيكي.

٤. ذاك الفصل يتطلب شغلا، والذي يظهر كطاقة كهروستاتيكية كامنة في الشحنات المنفصلة. تكتسب المناطق الموجبة الشحنة في السحابة القزعية فولطيات موجبة هائلة وتكتسب المناطق السالبة الشحنة فولطيات سالبة هائلة.

لماذا: عندما تكون الشحنات المتعاكسة قريبة من بعضها، فإنه ليس بالضرورة أن لديها طاقة كهروستاتيكية كامنة كبيرة لكل شحنة وقد تكون الفولطية صغيرة. إن فصل تلك الشحنات لمسافات كبيرة تزيد طاقتها المختزنة بشكل كبير وتنتج فولطيات عالية.

٥. التلامس بين المواد المختلفة يضع شحنة على الورقة، والتي بعد ذلك تحمل تلك الشحنة معها للأجزاء المعزولة في المطبعة. يمكن أن تتجمع شحنة كافية على تلك الأجزاء لتصبح خطرة.

لماذا: الورق غير الموصل ناقل ممتاز للشحنات الكهربائية. بمجرد أن تحمل الورقة شحنة ساكنة بملامسة مادة مختلفة، فإنه يمكنها أن تحمل تلك الشحنة معها أثناء تحركها خلال المطبعة. ليس من المستغرب أن المطابع الصحفية تستخدم العديد من الأدوات لإخماد هذا الشحن الستاتيكي.

٦. يمكن لحزام النقل العازل أن يفصل كميات هائلة من الشحنة، مؤدياً إلى فولطيات عالية، وشرارات، ومن المحتمل حريق. لا يمكن للحزام الموصل أن يحمل

شحنة معه أثناء تحركه، فلا تتجمع أي شحنة.

لماذا: عندما يكون للحزام العازل شحنة على سطحه، فإن تلك الشحنة يجب أن تتحرك مع الحزام. لكن الشحنات متحركة في حزام موصل ولا تتحرك معه في العادة.

١٠-٢ آلات الزيروغراف الناسخة

١. الشحنة التي تم وضعها على الورقة لجذب الحبر لا تُزال دائما كلية. علاوة على ذلك، الحبر ذاته مشحون.

لماذا: إن عملية النقل النهائية، أي رفع جسيمات الحبر من الموصل الضوئي إلى الورقة، تتم بشحن الورقة، وبعض من هذه الشحنة يظل على الورقة عندما تغادر آلة النسخ. شفافيات الآلة الناسخة بالخصوص متلاصقة لأن البلاستيك يحتفظ بالشحنة بشكل جيد.

٢. يشير عكسيا، بعيداً عن المريض.

لماذا: بما أن الإلكترونات مشحونة بشحنة سالبة، فإنها تتسارع في اتجاه معاكس للمجال. بما أن المعجّل يجب أن يدفع الإلكترونات إلى الأمام، باتجاه المريض، فإن مجاله يجب أن يشير بعيدا عن المريض.

٣. الشحنة المتجمّعة جميعها خارج السيارة الموصلة، لذا فإنها ستؤثر عليك فقط إذا خرجت من سيارتك ووفرت لها مسار توصيل بالأرض.

لماذا: بما أن جسم السيارة هو موصل كهربائي وشحناتها في وضع اتزان، فإن السيارة لها فولطية منتظمة ولا يوجد مجال كهربائي داخل السيارة. ولكن خارج السيارة، هناك مجال كهربائي كبير. إذا وفّر جسمك مسارا موصلا إلى الأرض، فإن ذلك المجال الكهربائي سيدفع الشحنات خلالك وستواجه صدمة. وبالمثل، إذا سقطت خطوط الطاقة على سيارتك أثناء عاصفة، ابق داخل السيارة لكي تتجنب صدمة قد تكون مميتة.

٤. تبعث الإبرة شحنات إلى الهواء عن طريق تفريغ هالي.

لماذا: تعمل الإبرة كقضيب برق شخصي لك. عندما تحمل محصلة شحنة كهربائية، فإن بعضاً من تلك الشحنة تستقر على الإبرة. يُبدئ المجال الكهربائي الكبير بالقرب من طرف الإبرة تفريغاً هالياً، ومعظم شحنتك المتجمعة تغادر خلالها. هذا التفريغ يحُد من محصلة شحنتك الكهربائية وبالتالي من حجم أي صدمة تواجهها.

٥. يصبح القضيب مشحوناً بشحنة موجبة.

لماذا: يُشحن قضيب البرق بالحث - تجذب شحنات السحابة السالبة شحنات موجبة لأعلى السلك وإلى القضيب. يُبدئ طرف القضيب الحاد تفريغا هاليا يقوم برش شحنات موجبة باتجاه السحابة ويقلل تدريجيا من شحنة السحابة. بهذه الطريقة، يعمل قضيب البرق على إخماد ضربات البرق.

١٠-٣ الكشّافات الضوئية

١. إزالة سلك واحد من البطارية يكسر الدائرة الكهربائية ويمنع تدفق تيار كهربائي مستمر خلال نظام السيارة الكهربائي.

لماذا: لا يمكن للبطارية ولا باقي السيارة أن تجمع الشحنات بشكل لا نهائي. بدون سلك لحمل الشحنات من البطارية إلى السيارة وسلك آخر لإعادة تلك الشحنات من السيارة إلى البطارية، فإن تجمّعاً سيحدث وستتوقف حركة الشحنات.

٢. يتدفق التيار من المعدن باتجاه يدك.

لماذا: بسبب أن التيار يُعرّف كتدفق الشحنات الموجبة، فإنه يشير في اتجاه معاكس لتدفق الشحنات السالبة. وبالتالي يتدفق التيار من المعدن باتجاه يدك. تتحرك هذه الشحنات لفترة قصيرة فقط لأنه لا يوجد دائرة كهربائية. لكي تتحرك الشحنات باستمرار يجب أن يُعاد تدويرها وتصبح الدائرة الكهربائية ضرورية.

٣. كل بطارية توفر 2V على حدة.

لماذا: تتجمع الفولطية لكل بطارية منفردة بحيث يتطلب ست بطاريات ذات 2V لتُعطي سلسلة ذات 12V. إذا ضعفت إحدى البطاريات، نتيجة عطب أو فقد في مائعها أو استهلاك طاقتها الكيميائية الكامنة، فإن فولطية السلسلة ستنخفض لأقل من 12V. دفع التيار عكسيا خلال بطاريات الرصاص يعيد شحنها.

٤. الأسلاك لها مقاومات كهربائية عالية نسبيا.

لماذا: يتطلب تشغيل سيارتك تيارا ضخما ويجب على الأسلاك التي توفّر ذلك التيار أن لا تحُده أو تُهدر طاقته. أسلاك التنشيط الرخيصة لها مقاومة كهربائية كبيرة فلا تحقق تلك المتطلبات. ليس هناك بديل لأسلاك تنشيط جيدة وسميكة - هي تستحق الزيادة في الثمن.

٥. السلك الذي يدخل منه التيار إلى المذياع.

لماذا: يستهلك المذياع قدرة، لذا فإن التيار المار خلاله يواجه هبوطاً فولطياً. التيار له فولطية أعلى عندما يدخل المذياع منه عند خروجه.

٦. في جلدك.

لماذا: تشابه الموائع في جسمك الماء المالح عند تعرضه للفولطيات؛ فهما يوصلان التيار بشكل جيد نسبيا. لولا مقاومة جلدك الكهربائية الكبيرة، لاستطاعت حتى فولطيات البطاريات أن تدفع تيارات كبيرة خلالك وقد تُعطل قلبك والعمليات الأخرى. لكن مقاومة جلدك العالية تحميك من فولطيات البطاريات. طالما أن جلدك جاف وسليم، فإنه في الغالب يتطلب فولطيات أعلى لدفع تيار كافٍ خلالك لإحداث ضرر.

دقق في أرقامك - الإجابات

١٠-١ الكهرباء الساكنة

١. 4N.

لماذا: وفقاً لقانون كولوم، تتفاوت القوة على كل شحنة عكسيا مع مربع المسافة بينهما. بتقليص المسافة إلى النصف، فأنت تزيد القوة الكهروستاتيكية بمقدار 4.

١٠-٢ آلات الزيروغراف الناسخة

١. مجال كهربائي مقداره 1000N/C ومتجه للأعلى.

لماذا: المجال الكهربائي يساوي القوة التي يبذلها مقسومة على الشحنة، أو 10^{-8}N مقسومة على 10^{-11}C. يجب أن يشير المجال للأعلى لدعم الوبر ذي الشحنة الموجبة ضد جذب الجاذبية للأسفل.

٢. حوالي 1.2m ‏(4ft).

لماذا: بفرق فولطية مقداره ١٢٠ فولت بين طرفي الأنبوب وطول 1.2m، فإن المجال الكهربائي للأنبوب سيكون 120V مقسوما على 1.2m، أو حوالي 100 V/m. هذه النتيجة تفسّر لماذا يكون طول العديد من المصابيح الفلورية في الولايات المتحدة حوالي 1.2m ‏(4ft).

١٠-٣ الكشّافات الضوئية

١. 2400W.

لماذا: الهبوط الفولطي عبر محرك التشغيل المبدئي هو 12V (كل كولوم من الشحنة يفقد 12J من الطاقة أثناء مرورها خلاله) والتيار خلاله هو 200A (تمر 200C من الشحنة خلاله كل ثانية). يمكننا استخدام معادلة (١٠،٣،١) لتحديد القدرة التي يستهلكها المحرك:

القدرة المستهلكة = الهبوط الفولطي · التيار = 12V · 200A = 2400W

٢. 1800W.

لماذا: ارتفاع الفولطية عبر البطارية هو 12V (كل كولوم من الشحنة يكتسب 12 J من الطاقة أثناء مرورها خلال البطارية) والتيار خلالها هو 150A (تمر 150C من الشحنة خلالها كل ثانية). يمكننا استخدام معادلة (10.3.2) لتحديد القدرة التي توفرها البطارية:

القدرة المكتسبة = الارتفاع الفولطي · التيار = 12 V · 150 A = 1800W

٣. المصباح ذو المقاومة 3Ω.

لماذا: تشير معادلة (١٠،٣،٣) إلى أنه بهبوط فولطي مقداره 3V موفر من قِبل البطاريتين القلويتين، فإن المصباح ذا 3Ω سيحمل:

$$\text{التيار} = \frac{\text{الهبوط الفولطي}}{\text{المقاومة الكهربائية}} = \frac{3V}{3\Omega} = 1A$$

وبعدها تُظهر المعادلة (10.3.1) أن هذا المصباح يستهلك المقدار المحدد 3W:

القدرة المستهلكة = الهبوط الفولطي · التيار = 3V · 1A = 3W

بهبوط فولطي مقداره 3V، فإن المصباح ذا 12Ω سيحمل تياراً مقداره 0.25A ويستهلك فقط 0.75W من القدرة. يحتاج إلى هبوط فولطي مقداره 6V ليستهلك 3W.

تمارين

١. إذا تنافر جسمان، فأنت تعلم أن عليهما شحنات متشابهة. لكن كيف ستحدد ما إن كانت شحنة كليهما موجبة أم سالبة؟

٢. لديك لعبة متعادلة كهربائيا والتي تقسمها إلى جزئين. تلاحظ أن أحد هذين الجزئين على الأقل له شحنة كهربائية. هل يجذب الجزءان بعضهما البعض أم يتنافران، أم ليس هذا ولا ذاك؟

٣. افرض أن لديك عصا مشحونة كهربائيا. إذا قسمت العصا نصفين، فإن كل نصف سيكون له نصف الشحنة الأصلية. إذا قسمت كل من هذين القسمين، فإن كل قسم سيكون له رُبع الشحنة الأصلية. هل يمكنك الاستمرار في تقسيم الشحنات بهذه الطريقة إلى الأبد؟ إذا كانت الإجابة لا، فلماذا؟

٤. تحتوي كرة بولنج على عدد هائل من الجسيمات المشحونة كهربائيا. لماذا في العادة لا تبذل كرتا بولنج قوى كهروستاتيكية على بعضهما البعض؟

٥. في الأماكن الصناعية، كثيراً ما يتم طلي الأجسام المعدنية المتعادلة كهربائيا عن طريق رشها بطلاء أو بجسيمات مسحوق مشحونة كهربائياً. كيف يمكن أن يساعد وضع شحنة على الجسيمات على التصاقها بسطح جسم؟

٦. يُعطى الطلاء أو جسيمات المسحوق التي تم مناقشتها في تمرين ٥ نفس الشحنة الكهربائية. لماذا يضمن هذا النوع من الشحن أن الطلي سيكون منتظما بشكل عالٍ؟

٧. إذا لم تضعف القوى بين الشحنات الكهربائية مع المسافة، فإن البالون المشحون كهربائيا لن يلتصق بجدار متعادل كهربائيا. لِمَ لا؟

٨. يجلي المولد الأيوني الدخان من هواء غرفة عن طريق شحن جسيمات الدخان كهربائيا. لماذا ستلتصق جسيمات الدخان المشحونة بالجدار والأثاث؟

٩. بعد أن تسحب قطعتين من الشريط اللاصق من حاوية الشريط، فإن تلك القطعتين ستتنافران مع بعضهما البعض. فسّر تنافرهما.

١٠. بعد أن تقشر لاصقاً من ورقته، فإنهما سيجذبان بعضهما. فسّر تجاذبهما.

١١. تمسك بيديك بالونين مشحونين بشحنات متعاكسة. قارن بين فولطياتهما

١٢. تبدأ بفصل البالونين في تمرين ١١. أنت تبذل شغلاً على البالونين، فطاقتك تقل. أين تذهب طاقتك؟

١٣. عندما تفصل البالونين في تمرين ١٢، هل تتغير فولطيتهما؟ إذا نعم، كيف تتغير تلك الفولطيات؟

١٤. يوضح ملصق بطارية سيارة أنها توفّر 12V. قارن بين الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة للشحنة الموجبة على الطرف السالب للبطارية مع تلك التي على طرفها الموجب.

١٥. عندما يعمل التقنيون على الإلكترونيات الحسّاسة للشحنات الساكنة، فإنهم يحاولون جعل البيئة التي يعملون بها موصلة كهربائيا بأكبر قدر ممكن. لماذا يُضعف هذا التوصيل من خطر الكهرباء الساكنة؟

١٦. معالجة الأقمشة ضد الكهرباء الساكنة يترك الأقمشة موصلة كهربائيا قليلا. كيف تساعد هذه المعالجة من تقليل الكهرباء الساكنة؟

١٧. إن وضع يدك على مولد كهرباء ساكنة (على سبيل المثال، مولد فاندوغراف) يمكن أن يجعل شعرك يقف، لكن فقط إذا كنت واقفا على عازل كهربائي جيد. لماذا يكون هذا العازل مهماً؟

١٨. في تمرين ١٧، استخدامك بلسماً للشعر يساعد شعرك للوقوف حقيقة. لماذا؟

١٩. المجال الكهربائي حول فرشاة شعر مشحونة كهربائيا يقل مع المسافة من تلك الفرشاة. استخدم قانون كولوم لتفسير هذا التناقص في مقدار المجال.

٢٠. في أي اتجاه يشير المجال الكهربائي حول الطرف الموجب لبطارية قلوية؟

٢١. أيهما له المجال الكهربائي الأقوى بين طرفيه: بطارية مقاس AA ذات 1.5V، أم بطارية اعتيادية ذات 9V؟ فسّر ذلك.

٢٢. لديك 100 بطارية مقاس AA. كيف يمكنك ترتيب تلك البطاريات لكي تُنشئ أقوى مجال كهربائي؟

٢٣. قد يبدو المكوث داخل السيارة أثناء عاصفة رعدية خطراً، لكنه في الحقيقة آمن نسبيا. بما أن السيارة هي في الأصل صندوق معدني، فإن داخل السيارة متعادل كهربائيا. لماذا تتحرك أي شحنة على السيارة إلى سطحها الخارجي؟

٢٤. في بعض الأوقات يتم تنفيذ تجارب كهرومغناطيسية حسّاسة داخل غرف محجوبة بجدران معدنية. لماذا يقلل هذا التطويق من المجالات الكهربائية المتناثرة؟

٢٥. عندما تمر سحابة مشحونة بشحنة موجبة فوقنا أثناء عاصفة رعدية، ففي أي اتجاه يشير المجال الكهربائي؟

٢٦. تجذب السحابة في التمرين ٢٥ شحنة سالبة كبيرة لأعلى شجرة في حقل مفتوح. لماذا يكون مقدار المجال الكهربائي أكبر في أعلى الشجرة مقارنة بأي مكان آخر في الحقل المفتوح؟

٢٧. يمكن أن تحدث التفريغات الهالية أينما كان هناك مجال كهربائي قوّي. لماذا يوجد مجال كهربائي قوّي حول نقطة حادة على جسم معدني مشحون كهربائيا؟

٢٨. لتقليل التفريغات الهالية، فإن أبراج القدرة الكهربائية تُغطي في بعض الأحيان التوصيلات والمعالم الحادة الأخرى بحلقات أو أغطية مقوّسة معدنية. كيف يمكن لتلك البنيات العريضة الملساء أن تمنع التفريغات الهالية؟

٢٩. إذا كنت واقفاً يوماً ما على قمة جبل ومرت سحابة سوداء فوق رأسك ووقف شعرك، غادر الجبل بسرعة. كيف أمكن لشعرك أن يكتسب الشحنة التي جعلته يقف؟

٣٠. يضخ مصدر القدرة لسياج كهربائي شحنة من الأرض إلى أسلاك السياج، والتي هي معزولة عن الأرض. تستطيع الأرض أن توصّل الكهرباء. عندما يسير حيوان خلال الأسلاك، فإنه يتعرض لصدمة. وضح الدائرة الكهربائية التي يتدفق خلالها التيار.

٣١. يمكن أن يجلس طائر على خطوط الفولت العالي دون أن يتعرض لصدمة. لماذا لا يتدفق تيار خلال الطائر؟

٣٢. إن إصبعي سلك الكهرباء مُعدة لحمل التيار من وإلى المصباح. إذا كنت ستوصل أحد الإصبعين فقط في المقبس، فإن المصباح لن يضيء بتاتاً. لماذا لا يتوهج على الأقل عند نصف وهجه الطبيعي؟

٣٣. مزيل الصقيع في نافذة سيارتك الخلفية هو نمط من الأشرطة المعدنية الرقيقة عبر النافذة. عندما تُشغّل مزيل الصقيع، يتدفق تيار خلال تلك الأشرطة المعدنية. لماذا توجد أسلاك متصلة بكلا طرفي الأشرطة المعدنية؟

٣٤. إذا لمست فقط طرف مأخذ السمّاعة الرأسية بفتحة مأخذ السمّاعة في مسجّل متنقل، ما هو مستوى الصوت الذي ستنتجه السمّاعة الرأسية؟

٣٥. إذا نقلت بعض الشحنة (الموجبة) إلى الطرف السالب في بطارية، فإن بعضاً من تلك الشحنة ستتحرك بسرعة لطرف البطارية الموجب. هل سيكون مخزون البطارية من الطاقة الكيميائية الكامنة قد تغير، وإذا كانت الإجابة نعم، هل زادت أم قلّت؟

٣٦. إذا نقلت بعض الشحنة الموجبة إلى الطرف الموجب للبطارية، فإن بعضاً من تلك الشحنات ستتحرك بسرعة إلى الطرف السالب للبطارية. هل سيكون مخزون البطارية من الطاقة الكيميائية الكامنة قد تغير، وإذا كانت الإجابة نعم، هل زاد أم قلّ؟

٣٧. عندما تقوم بوصل جهاز متنقل في مقبس الطاقة داخل سيارة، فإن تياراً يتدفق إلى الجهاز خلال مسمار مركزي في ذلك المقبس ويعود إلى السيارة خلال الحلقة الخارجية للمقبس. أي من وصلات المقبس لها الفولطية الأعلى؟

٣٨. عندما يتدفق تيار خلال مزيل الصقيع الخلفي في سيارة (تمرين ٣٣)، فإن الفولطية عند كلٍ من طرفي الأشرطة المعدنية تكون مختلفة. أي طرف في كل شريط له فولطية أعلى، الطرف الذي يدخل منه التيار للشريط أم الطرف الذي يخرج منه، وما الذي يُسبب الهبوط الفولطي؟

٣٩. أُعطيتَ صندوقاً مغلقاً له طرفان. تستخدم بعض الأسلاك والبطاريات لإرسال تيار كهربائي داخل الطرف الأيسر للصندوق فتجد أن هذا التيار يخرج من الطرف الأيمن. إذا كانت فولطية الطرف الأيمن 6V أعلى من تلك التي في الطرف الأيسر، فهل يستهلك الصندوق قدرة أم يوفّرها؟ هل من المحتمل أن يحتوي الصندوق على بطاريات أم مصابيح؟ كيف يمكنك أن تعرف؟

٤٠. طريقة تفاخرية لكن غير محبذة يستخدمها بعض الهواة لتحديد مقدار الطاقة المتبقية في بطارية ذات 9V هي أن يلمس طرفي البطارية بلسانه لفترة وجيزة. إنه يشعر بوخز خفيف إذا كانت البطارية ميتة تقريباً لكنه يشعر بوخز كبير إذا كانت البطارية جديدة. (لا تجرّب هذه الطريقة بنفسك.) ما هي الدائرة الكهربائية المتضمنة في اختبار التذوق هذا؟ كيف يتم نقل الطاقة؟

٤١. يُستخدم اللحام النقطي لصهر قطعتي معدن سوية في نقطة صغيرة واحدة. يربط قطبان من النحاس القطعتين المعدنيتين معاً في نقطة ثم يمرران تياراً كهربائياً كبيراً خلال تلك النقطة. تنصهر القطعتان المعدنيتان وتتدفقان سوية لتُشكّل بقعة اللحام. لماذا تنفع هذه التقنية فقط باستخدام الموصلات الكهربائية الضعيفة نسبيا مثل الفولاذ المقاوم للصدأ وليس باستخدام الموصلات الكهربائية الجيدة مثل النحاس؟

٤٢. لماذا من المهم أن يكون لفتيلة المصباح الضوئي مقاومة كهربائية أعلى من مقاومة الأسلاك التي تحمل التيار من وإلى تلك الفتيلة؟

مسائل

١. تزيل جوربين من مجففة الملابس الساخنة وتجد أنهما يتنافران مع بعضهما بقوة 0.001N عندما يكونان على مسافة 1cm عن بعضهما. إذا كان لهما شحنتان متساويتان، فما مقدار الشحنة التي يحملها كل جورب؟

٢. إذا فصلت الجوربين في المسألة ١ إلى أن يصبحا على بُعد 5cm عن بعضهما، ما القوة التي سيبذلها كل جورب على الآخر؟

٣. إذا كنت ستفصل جميع الإلكترونات والبروتونات في 1g (0.001kg) من المادة، سيكون لديك96,000C من الشحنة الموجبة ونفس المقدار من الشحنة السالبة. إذا فصلت هذه الشحنات بمسافة قدرها 1m، فما مقدار قوة التجاذب بينهما؟

٤. إذا وضعت 1C من الشحنة الموجبة على الأرض و1C من الشحنة السالبة على القمر والذي يبعد 384,500km، ما مقدار القوة التي ستواجهها الشحنة الموجبة على الأرض؟

٥. ما المسافة التي يجب أن تفصل بين شحنة موجبة مقدارها C 1 وأخرى سالبة مقدارها 1C لكي يبذلا قوة مقدارها 1N على بعضهما البعض؟

٦. محصلة القوة للأعلى على مكوك فضائي عند الإطلاق هي 10,000,000N. ما أقل مقدار من الشحنة يمكن أن تنقلها من مقدمة المكوك إلى قاعدة انطلاقه الموجودة أسفل المقدمة بمقدار 60m، وبالتالي تمنعها من الانطلاق؟

٧. ما القوة التي ستواجهها شحنة مقدارها 0.01C في مجال كهربائي مقداره 5 N/C مشيراً للأعلى؟

٨. جورب له شحنة مقدارها 0.0005C- موجود في مجال كهربائي مقداره 1000 N/C مشيراً إلى اليمين. ما القوة التي يواجهها الجورب؟

٩. قطعة من غلاف بلاستيكي ذات شحنة 0.00005C تواجه قوة إلى الأمام مقدارها 0.0010N. ما هو المجال الكهربائي المحلي؟

١٠. تواجه كرة من الفلّين ذات شحنة -1.0×10^{-6} C قوة للأعلى مقدارها 0.01N في مجال كهربائي. ما هو ذلك المجال الكهربائي؟

١١. إذا وضعت شحنة مقدارها 0.0001C في منتصف المسافة بين طرفي بطارية معتادة ذات 9V، والتي تبعد 5mm عن بعضهما، ما هي القوة التي ستواجهها تلك الشحنة؟

١٢. إذا وضعت شحنة مقدارها 0.0001C في منتصف المسافة بين طرفي بطارية AA ذات 1.5V، والتي تبعد 5cm عن بعضهما، ما هي القوة التي ستواجهها تلك الشحنة؟

١٣. سيارة لها مصباح قراءة في سقفها له قدرة 12W. يعمل هذا المصباح بهبوط فولطي عبره مقداره 12V . ما مقدار التيار الذي يتدفق خلال المصباح؟

١٤. يعمل مزيل الصقيع في نافذة سيارتك الخلفية بتيار مقداره 5A. إذا كان الهبوط الفولطي خلاله هو 10V، ما مقدار القدرة الكهربائية التي يستهلكها بينما يذيب الصقيع؟

١٥. يستخدم مذياعك الـ FM المتنقل بطاريتين ذات 1.5V في سلسلة. إذا أرسلت البطاريتان تياراً مقداره 0.05A خلال المذياع، ما مقدار القدرة التي توفرانها للمذياع؟

١٦. لديك كشّافان ضوئيان يعملان ببطاريات مقاس D ذات 1.5V. يستخدم الكشّاف الضوئي الأول بطاريتين في سلسلة بينما يستخدم الثاني خمس بطاريات في سلسلة. كل من الكشافين الضوئيين له تيار مقداره 1.5A يتدفق خلال دائرته

الكهربائية. ما القدرة المنقولة للمصباح في كل من الكشّافين الضوئيين؟

١٧. لديك كشّافان ضوئيان يتدفق خلالهما تيار مقداره 2A. أحد الكشّافين الضوئية له بطارية واحدة في دائرته الكهربائية مقدارها 1.5V، بينما الكشّاف الضوئي الثاني له ثلاث بطاريات كل منها 1.5V متصلة في سلسلة والتي توفّر 4.5V. ما مقدار القدرة التي توفرها البطارية في الكشّاف الضوئي الأول؟ ما مقدار القدرة التي توفّرها كل بطارية في الكشّاف الضوئي الثاني؟

١٨. ما مقدار القدرة التي يستهلكها المصباح في الكشّاف الضوئي الأول في مسألة ١٧؟ ما مقدار القدرة التي يستهلكها المصباح في الكشّاف الضوئي الثاني؟

١٩. يمكن لبطارية مقاس D ذات 1.5V أن توفر طاقة كهربائية مقدارها 40,000 J تقريبا. إذا تدفق تيار مقداره 2A خلال بطاريتين مقاس D وهما في الدائرة الكهربائية لكشّاف ضوئي، إلى متى ستستطيع البطاريتان أن توفّر قدرة للكشّاف الضوئي؟

٢٠. تستخدم سيارة ذات تحكّم لاسلكي أربع بطاريات مقاس AA لتوفّر 6V لمحركها. عندما تتحرك السيارة إلى الأمام بأقصى سرعة، يتدفق تيار مقداره 2A خلال المحرك. ما مقدار القدرة التي يستهلكها المحرك في ذلك الوقت؟

٢١. بطارية سيارتك ميتة، وأصدقاؤك يساعدونك لتشغيل سيارتك بأسلاك تنشيط رخيصة. يحمل أحد الأسلاك تياراً من سيارتهم إلى سيارتك، والسلك الثاني يعيد ذلك التيار لسيارتهم. حينما تحاول تشغيل سيارتك، يتدفق تيار مقداره 80A خلال الأسلاك إلى سيارتك وعودة منها، ويظهر هبوط فولطي مقداره 4V عبر كل سلك. ما مقدار المقاومة الكهربائية لكل سلك تنشيط؟

٢٢. إذا استبدلت الأسلاك الرخيصة في مسألة ٢١ بأسلاك لها نصف مقاومتها الكهربائية، ما الهبوط الفولطي الذي سيظهر عبر كل سلك جديد إذا لم يتغيّر التيار؟

٢٣. كل من السلكين في توصيلة سلكية معينة مقاس 16 له مقاومة كهربائية مقدارها 0.04Ω . أنت تستخدم هذه التوصيلة السلكية لتُشغّل فرن التحميص، لذا فإن تياراً مقداره 15A يتدفق خلالها. ما هو الهبوط الفولطي عبر كل سلك في هذه التوصيلة السلكية؟

٢٤. ما مقدار القدرة المهدرة في كل سلك في التوصيلة السلكية في مسألة ٢٣؟

٢٥. يحمل سلكان في خط الطاقة ذي الفولطية العالية تياراً قدره 600A من وإلى مدينة. الفولطية بين السلكين هي 400,000V. ما مقدار القدرة التي يوصلها خط الطاقة إلى المدينة؟

٢٦. لإحضار كهرباء إلى منازل فردية، فإن القدرة في مسألة ٢٥ تنتقل إلى دوائر كهربائية ذات فولطية منخفضة بحيث يواجه التيار المار خلال المنازل هبوطاً فولطياً مقداره 120V فقط. ما مقدار التيار الكلي المار خلال منازل المدينة؟

٢٧. ما مقدار التيار المتدفق خلال فتيلة تسخين مقاومتها الكهربائية 100Ω عندما يكون الهبوط الفولطي عبره 5V؟

٢٨. إذا عرّضت فتيلة تسخين ذات مقاومة كهربائية 2500Ω لهبوط فولطي مقداره 100V، فما مقدار التيار الذي سيتدفق خلالها؟

٢٩. إذا واجه تيار مقداره 10A هبوطا فولطيا مقداره 1V بينما يتدفق خلال سلك طويل، ما هي المقاومة الكهربائية لذلك السلك؟

٣٠. يتدفق تيار مقداره 2A خلال سلك متصل بجرس بعيد ويواجه هبوطاً فولطياً مقداره 2V. ما هي المقاومة الكهربائية لذلك السلك؟

٣١. إذا أرسلت تياراً مقداره 5A خلال سلك مقاومته الكهربائية 1Ω، ما مقدار الهبوط الفولطي الذي سيواجهه ذلك التيار؟

٣٢. إذا كانت فتيلة تسخين مقاومتها الكهربائية 1000Ω تحمل تيارا مقداره 0.120A، فما الهبوط الفولطي الذي يواجهه ذلك التيار؟

الفصل ١١ المغناطيسية والديناميكا الكهربائية

المغناطيسية، مثل الكهرباء، هي جزء مهم في حياتنا اليومية. نحن نستخدمها لتثبيت أوراقنا على الثلاجة ولمعرفة أي الاتجاهات هو اتجاه الشمال. لكن قصة المغناطيسية لن تكتمل دون أن تتضمن الكهرباء. كما سنرى، هذان الموضوعان مرتبطان ببعضهما البعض من خلال التغير والحركة. فمثلا، تحريك شحنات كهربائية يكوّن مغناطيسية، والتغير في المغناطيسية يكوّن كهرباء.

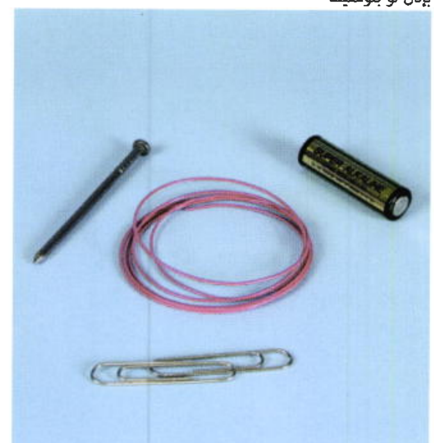
في هذا الفصل، سوف نفحص المغناطيسية ذاتها، إضافة إلى العديد من الأجسام التي تستخدم العلاقات بين الكهرباء والمغناطيسية لتقوم بمهام مفيدة. بما أن كلمة «ديناميكا» تشمل كل من التغيّر والحركة، فإن هذه العلاقات هي جزء من مجال يُعرف «بالديناميكا الكهربائية». الاختصار ليس هو السبب الوحيد لإهمال الإشارة إلى المغناطيسية في هذا المسمى؛ السبب الآخر هو أن معظم المغناطيسية هي في الواقع ناتجة من الكهرباء.

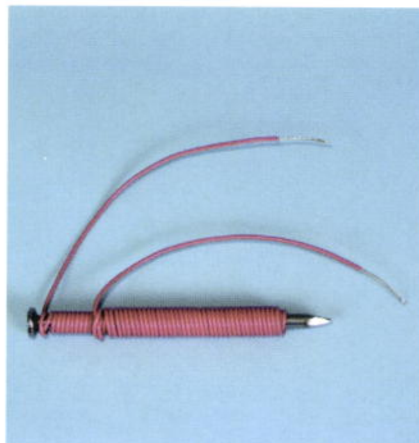
تجربة: مغناطيس كهربائي ذو مسمار وسلك

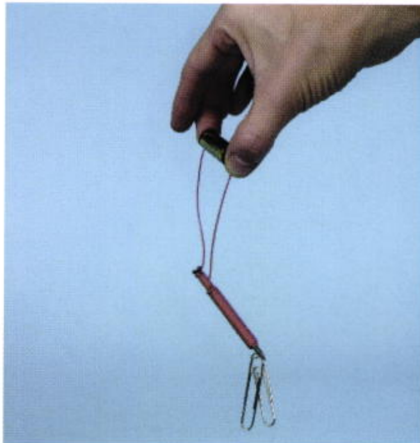
لاستكشاف العلاقات بين الكهرباء والمغناطيسية، حاول أن تبني مغناطيساً كهربائياً بسيطاً. للقيام بهذا المشروع، ستحتاج مسماراً فولاذياً طويلاً أو صامولة، وسلكاً معزولاً طوله حوالي متر تقريبا، وبطارية جديدة مقاس AA ذات 1.5V، وبعضاً من الأجسام الفولاذية الصغيرة مثل مشابك الورق. يجب أن يكون قطر الموصل المعدني للسلك على الأقل 0.65mm (مقاس ٢٢ أو أكبر) لحمل التيار الذي سترسله خلاله دون أن يُصبح ساخنا جدا.

قم بلف السلك حول المسمار أو الصامولة لكي تكوّن ملفاً. يجب أن تُكمل ٥٠ لفة للسلك على الأقل، كلها في نفس الاتجاه. هذا العدد بالضبط ليس مهماً، ويمكنك أن تجعل اللفات على هيئة عدة طبقات. تأكد من أن طرفي السلك ما زالت في متناول اليد وقم بإزالة العازل من كل طرف حتى تستطيع أن توصلهما بالبطارية.

بإذن لو بلومفيلد







تحذير

المغناطيس الكهربائي الذي ستقوم ببنائه في هذه التجربة سيصبح ساخنا أثناء الاستخدام. كن مستعدا لإسقاط المغناطيس الكهربائي إذا أصبح ساخنا فوق الاحتمال.ولا تعمل بالقرب من مواد قابلة للاشتعال.

والآن جرّب مغناطيسك الكهربائي. صِلْ أحد طرفي الملف غير المعزولة لكل طرف من البطارية. يمكنك إما أن تُمسك الأسلاك على أطراف البطارية بأصابعك أو باستخدام لصق. لا يمكن لبطارية 1.5V أن تعطيك صدمة إلا إذا كان جلدك متشققاً، لكن كن مستعدا لأن يسخن السلك حينما يتدفق التيار خلاله. إذا أصبح السلك ساخنا جدا ولا يمكنك الإمساك به، اتركه وتأكد من أن السلك انفصل عن البطارية حتى لا يُحدث حريقاً. لا تستخدم بطارية أكبر من بطارية مقاس AA وإلا قد يصبح السلك ساخنا لحد الخطورة.

بينما يتدفق التيار خلال السلك، سيعمل المسمار كمغناطيس قوي، وهو ما يُعرف بالمغناطيس الكهربائي. حاول أن ترفع أجساماً مصنوعة من الفولاذ بهذا المغناطيس الكهربائي. حينما تلمس كل جسم بالمسمار، فإنه سيلتصق بسطح المسمار. سيمغنط مغناطيسك الكهربائي الأجسام الفولاذية مؤقتا ويجذبها. حاول أن تتنبأ ماذا سيحدث عندما تلامس هذا الجسم الفولاذي الممغنط بجسم آخر. شاهد ماذا سيحدث وانظر ما إذا كان بإمكانك التحقق من تنبئك. هل يمكنك التفكير في طريقة لقياس مقدار قوة المغناطيس؟ ماذا سيحدث عندما توقِف تدفق التيار الكهربائي خلال ملف المغناطيس الكهربائي؟ لماذا يسخن الملف أثناء تدفق التيار خلاله؟

دليل الفصل

سوف يفحص هذا الفصل (١) المغنطيسات المنزلية، و(٢) توزيع القدرة الكهربائية، و(٣) المولدات والمحركات الكهربائية. في قسم المغنطيسات المنزلية، سوف ننظر في القوى التي تربط المغنطيسات بالثلاجات ونرى لماذا تشير البوصلات نـحو الشمال. سوف نفحص أيضا المغنطيسات الكهربائية لكي نستطيع تفسير كيف تعمل أجراس الباب الكهربائية. في قسم توزيع القدرة الكهربائية، سوف نرى كيف تُستخدم الكهرباء والمغنطيسية لنقل القدرة الكهربائية من محطات الكهرباء البعيدة إلى منزلك وكيف تختلف تلك القدرة الكهربائية عن القدرة الكهربائية التي توفرها البطاريات. في قسم المولدات والمحركات الكهربائية، سوف ننظر في الطرق التي تُستخدم فيها القدرة الميكانيكية لإنتاج قدرة كهربائية والتي تُستخدم فيها القدرة الكهربائية لإنتاج قدرة ميكانيكية. في حين أن هناك الكثير من الأجسام المغنطيسية والكهرومغنطيسية التي نواجهها يوميا، إلا أن هذه المواضيع الثلاثة تُمثّل معظم الظواهر الكهرومغنطيسية الأساسية. ولعرض أكثر شمولا، اقلب الصفحات إلى ملخص الفصل في صفحة ٣٧٤.



١١-١ المغنطيسات المنزلية

كيف يمكن لأسرة أن تظل منظمة دون استخدام مغنطيسات الثلاجة؟ كيف سيرنّ جرس الباب إذا لم يكن ممكنا استخدام مغناطيس لضرب أجراسه؟ كيف يمكن لفتى في الكشّافة أن يسير في الغابات دون بوصلة؟ وكيف يمكنك أن تحصل على نقود أو تحاسب عند الشراء دون وجود الأشرطة الممغنطة على البطاقات البلاستيكية؟

لقد اعتدنا وجود المغنطيسات من حولنا بحيث أننا لا نلقي لها بالا وإضافة لكونها مفيدة، فإن المغنطيسات المنزلية تسمح لنا أن نتعرف على بقوة أخرى أساسية من قوى الطبيعة ونقوم بتجارب عليها. بالرغم من أننا سنرى أن المغنطيسية مرتبطة ارتباطا جوهريا بالكهرباء بحيث أنهما يشكلان وحدة واحدة متكاملة، إلا أننا سنجد أنه من المفيد أن نبدأ دراستنا للمغنطيسية كظاهرة منفصلة ثم نُدخل الكهرباء في الصورة تدريجيا.

أسئلة للتفكير

لماذا يتجاذب أو يتنافر مغنطيسان، اعتماداً على اتجاههما؟ إذا انجذب مغنطيس لثلاجتين مختلفتين، فلماذا لا تتجاذب أو تتنافر هاتان الثلاجتان مع بعضهما البعض؟ كيف يمكن لمغنطيسين قويّين أن يمسكا ببعضهما على جانبي يدك؟ لماذا لا تشترك يدك في ذلك التجاذب المغنطيسي؟ كيف يمكن فتح أو غلق الخاصية المغنطيسية لبعض المغنطيسات باستخدام الكهرباء؟

تجارب يمكن القيام بها

ابحث عن مغنطيسي ثلاجة شبيهين بالأزرار – ذات شكل اسطواني بسيط يشبه أقراص هوكي صغيرة. إذا حاولت تكديس هذين المغنطيسين، ستجد أنهما إما أن يتجاذبا أو يتنافرا. كيف تعتمد هذه القوى على اتجاه المغنطيسين؟ وعلى المسافة بينهما؟ حاول أن تجعل أحد المغنطيسين يطفو فوق الآخر باستخدام قوة التنافر. ماذا يحدث إذا تركت المغنطيس الأعلى؟ الآن امسك بأحد المغنطيسين الشبيهين بالزر بالقرب من ثلاجة أو جسم فولاذي آخر وادرس القوى التي تنشأ. هل يمكنك إيجاد طريقة لجعل الجسمين يتنافران؟ هل سيلتصق المغناطيس بأشياء ليست مصنوعة من الفولاذ؟ وماذا عن الفولاذ

المقاوم للصدأ؟

الآن ابحث عن مغنطيسي ثلاجة متماثلين شبيهين بالورقة - أي أشرطة مرنة قد يكون مطبوع على أسطحها إعلانات. جرب تفاعلهما. ستجد أن مجرد قلب أحدهما لا يُغيّر القوى من تجاذب إلى تنافر. بدلا من ذلك، ستحتاج أن تزحلق الشريطين عبر بعضهما. حينما يتزحلقان، فإنها سيتجاذبان ويتنافران بالتبادل. كيف يكون هذا ممكنا؟

أخيرا، احصل على برادة حديد أو اصنعها ببرد قطعة من الفولاذ (معظم الفولاذ حديد وهما شبيهان من حيث المغنطيسية). انثر بعضا من هذه البرادة على تشكيلتك من المغنطيسات. إنها تُشكّل أشرطة تبدو كأنها جسر بين نقاط متعددة على المغنطيسات. ما هو الشيء الذي تكوّن البرادة جسرا بينه؟ إذا نثرت برادتك على بطاقة ائتمانية أو بطاقة تعريف ممغنطة، سترى أنها تكوّن جسوراً أيضا. لكن هذه الجسور صغيرة جدا ومتباعدة بمسافات غير منتظمة. هل من الممكن أن يكون هناك معلومات رمزية في هذه الأشكال المغنطيسية التيتكونها للمسافات غير المنتظمة؟

مغنطيسات الثلاجة الشبيهة بالأزرار

تأتي مغنطيسات الثلاجة على أشكال وأحجام مختلفة، وبعضها أكثر تعقيدا مغنطيسيا من الأخرى. من الأفضل دائما البدء بالبسيط، لذا سنبدأ بالمغنطيسات الشبيهة بالزرّ.

حينما تُحضر مغنطيسين بالقرب من بعضهما، فإنهما سيبدآن ببذل قوى على بعضهما البعض. ستجد أن هذه القوى يمكن أن تكون إما تجاذبية أو تنافرية، اعتماداً على اتجاه المغنطيسين، ولكنها تضعف دائما مع زيادة المسافة. تُشابه هذه القوى المغنطيسية القوى الكهربائية التي تواجهها عندما تُخرج الملابس الساخنة من مجففة الملابس ، ولكن هناك على الأقل اختلافين مهمين. أولا: تغيير اتجاه لباسين مشحونين كهربائيا لن يقلب تجاذبهما إلى تنافر والعكس بالعكس. ثانيا: بغض النظر عن كيفية ترتيبك زرين مغنطيسين، فلن تستطيع أن تجعل شرارة مغنطيسية تقفز من مغنطيس للآخر. فمن الواضح أن الكهرباء والمغنطيسية متشابهتان لكن مختلفتان. فما هي القصة؟

المغنطيسية هي ظاهرة تشابه الكهرباء كثيراً. فكما أن هناك نوعين من الشحنات الكهربائية التي تبذل قوى كهروستاتيكية على بعضهما البعض، كذلك هناك نوعان من الأقطاب المغنطيسية والتي تبذل قوى مغنوستاتيكية على بعضهما البعض. من المفيد استخدام كلمة «قطب» للتمييز بين المغنطيسية والكهرباء؛ فالأقطاب مغنطيسية بينما الشحنات كهربائية.

تسمى نوعا الأقطاب شمالاً وجنوباً، على التوالي، وبالمحافظة على هذه التسمية الجغرافية، فهما عكس بعضهما تماما. يحمل كلا النوعين من الأقطاب كمية فيزيائية واحدة: القطب المغناطيسي. تحمل الأقطاب الشمالية مقادير موجبة من القطب المغناطيسي بينما تحمل الأقطاب الجنوبية مقادير سالبة. من المفترض أن كون الأقطاب المتشابهة تتنافر بينما الأقطاب المختلفة تتجاذب أمرٌ غير مفاجئ. وعلاوة على ذلك، تضعف القوى المغنوستاتيكية بين قطبين أثناء تحركهما بعيدا عن بعض وتتناسب عكسيا مع مربع المسافة الفاصلة بينهما. إلى الآن، التشابهات بين الكهرباء والمغنطيسية مدهشة.

لكننا سنأتي الآن لاختلاف جوهري بين الكهرباء والمغنطيسية: في حين الجسيمات دون الذرية التي تحمل شحنات كهربائية موجبة أو سالبة خالصة هي شيء مألوف، إلا أن الأجسام التي تحمل أقطاباً مغنطيسية شمالية أو جنوبية خالصة لم توجد أبدا. تُسمى تلك بالأقطاب المغنطيسية الأحادية، ومثل هذه الجسيمات المغنطيسية الخالصة قد لا توجد في كوننا أصلاً. يُفسّر ذلك الحذف الكوني للأقطاب الأحادية سبب عدم وجود شرار مغناطيسي: بدون الأقطاب الأحادية، لا يوجد مكافئ مغنطيسي للشحنة الكهربائية والذي يمكن أن يقفز من مكان لآخر كتيار مغنطيسي، ناهيك عن شرارة مغنطيسية.

لكن في حين الأقطاب المغنطيسية المعزولة غير متوفرة في الطبيعة، إلا أن أزواج الأقطاب المغنطيسية موجودة. هذه الأزواج تتكون من أقطاب شمالية وجنوبية متساوية، مفصولة مكانيا عن بعضهما البعض في ترتيب يُسمّى ثنائي القطب المغنطيسي. بما أن القطبين المتعاكسين لهما مقادير متساوية، فإن مجموعهما صفر وثنائي القطب المغنطيسي له محصلة قطب مغنطيسي صفرية.



شكل ١,١,١١: (أ) المغنطيس الزري المعتـاد له قطب شـمالي على أحد الوجهين وقطب جنوبي على الآخر. ومحصلـة قطبيته صفر. (ب) قطع المغنطيس بين قطبيه أو (ج) كسره خلال قطبيه يُعطي دائما زوجاً من المغنطيسـات، كل منهـا بمحصلة قطبية صفرية.

المغنطيس الزري البسيط له كل من قطب شمالي وقطب جنوبي، وفي الغالب على الوجهين المتعاكسين للزر (شكل ١,١,١١ أ). ولا توجد أزرة شمالية خالصة أو جنوبية خالصة. من المدهش تماما، أن حتى قطع ذلك المغنطيس الزري إلى نصفين لن يُعطي أقطاباً شمالية وجنوبية منفصلة (شكل ١,١,١١ ب). بدلا من ذلك، ستظهر أقطاب جديد عند حواف القطع وكل قطعة من المغنطيس الأساسي سينتهي بها المطاف بمحصلة قطبية صفرية! قطع المغنطيس الزري إلى نصفين (شكل ١,١,١١ ج) سينتج أيضا قطعا لها محصلة قطبية صفرية.

يمكننا الآن تفسير لماذا يتجاذب اثنان من تلك المغنطيسات بعض الأحيان ويتنافرا أحياناً أخرى. فبوجود قطبين على كل مغنطيس، يجب أن نأخذ في الاعتبار أربعة تفاعلات: تفاعلان تنافريان بين الأقطاب المتشابهة (شمال-شمال وجنوب-جنوب) وتفاعلان تجاذبيان بين الأقطاب المتعاكسة (شمال-جنوب وجنوب-شمال).

وفي حين قد يبدو أن جميع هذه القوى يجب أن تُلغي بعضها، إلا أن المسافات الفاصلة بين الأقطاب المتعددة وبالتالي القوى بينها ستعتمد على اتجاهات المغنطيسات. فبما أن الأقطاب الأقرب تواجه القوى الأشد، فإنها تسيطر. إذا أدرت قطبين متشابهين باتجاه بعضهما البعض، فإن المغنطيسين سيدفعان بعضهما بعيدا عن بعض (شكل ٢,١,١١ أ). وإذا أدرت أقطابهما المتعاكسة باتجاه بعضهما البعض، فإنهما سيجذبان بعضهما (شكل ٢,١,١١ ب). وإذا أدرتهما بزاوية، فإنهما سيواجهان عزوماً تميل للفّ الأقطاب المتعاكسة نـحو بعضهما والأقطاب المتشابهة بعيدا عن بعضهما.

بدون أقطاب أحادية، سنحتاج بعضاً من الخيال لفهم المغنطيسية بشكل جيّد. لنبدأ بالوحدات. فحتى وإن لم نستطع تجميع وحدة قطب شمالي خالص إلا أننا مازلنا قادرين على تعريف مثل تلك الوحدة وفهم سلوكها. وحدة القطب المغناطيسي في النظام العالمي SI هي أمبير- متر (اختصارا A·m). هذا الاختيار المدهش، والذي يظهر فيه وحدة كهربائية في وحدة مغنطيسية، يُنبئ بالارتباط الوثيق بين الكهرباء والمغنطيسية والتي سنواجهه قريبا.

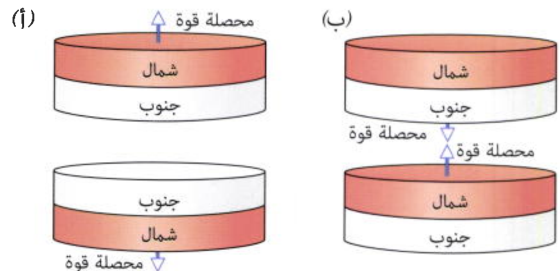
كما أن هناك قانون كولوم للشحنات الكهربائية، فهناك أيضا قانون كولوم للأقطاب المغنطيسية. أظهرت تجارب كولوم في المغنطيسية، والتي كانت معقدة لأنه اضطر أن يعمل بثنائيات الأقطاب المغنطيسية بدلا من أقطاب فردية، أن القوى بين الأقطاب المغنطيسية تتناسب طردياً مع مقدار كل قطب وعكسيا مع مربع المسافة الفاصلة بينهما. يمكن كتابة العلاقة كمعادلة لفظية: (١,١,١١)

$$\text{القوة} = \frac{\text{النفاذية في الفراغ . قطب}_1 \times \text{قطب}_2}{\text{(المسافة بين الأقطاب)}^2 \times 4\pi}$$

ورمزيا:

$$\text{Force} = \frac{\mu_0 \times p_1 \times p_2}{4\pi \times r^2}$$

وفي لغة الحياة اليومية:لا تمسك مغنطيسين قوّيين بالقرب من بعضهما إلا إذا كنت مستعدا لتندفع نحو مكان ما.



شـكل ٢,١,١١: (أ) عند إدارة القطبين المتشـابهين لمغنطيسين زريين نـحو بعضهما فإن المغنطيسـين يتنافران. (ب) عند إدارة القطبين المتعاكسين نـحو بعضهما البعض فإنهما يتجاذبان.

تتجه القوة على قطب$_1$ نـحو أو بعيدا عن قطب$_2$، وتتجه القوة على قطب$_2$ نـحو أو بعيدا عن قطب$_1$. نفاذية الفراغ هي $4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2. تمشيا مع قانون نيوتن الثالث، القوة المبذولة على قطب$_1$ من قِبل قطب$_2$ تساوي في المقدار وتعاكس في الاتجاه القوة المبذولة على قطب$_2$ من قِبل قطب$_1$.

قانون كولوم للمغنطيسية

مقادير القوى المغنوستاتيكية بين قطبين مغنطيسين تساوي النفاذية في الفراغ مضروبة في حاصل ضرب القطبين مقسومة على 4π في مربع المسافة الفاصلة بينهما. إذا كانت الأقطاب متشابهة، فالقوى تنافرية. وإذا كانت الأقطاب متعاكسة، فالقوى تجاذبية.

تحقق من فهمك #١: نصفان يصنعان واحداً (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

لديك مغنطيس دائم على شكل قرص. السطح العلوي هو قطبه الشمالي والسطح السفلي هو قطبه الجنوبي. إذا كسرت المغنطيس إلى نصفي دائرة، فإن النصفين سيدفعان بعضهما بعيدا عن بعض. لماذا؟

الثلاجة: الحديد والفولاذ

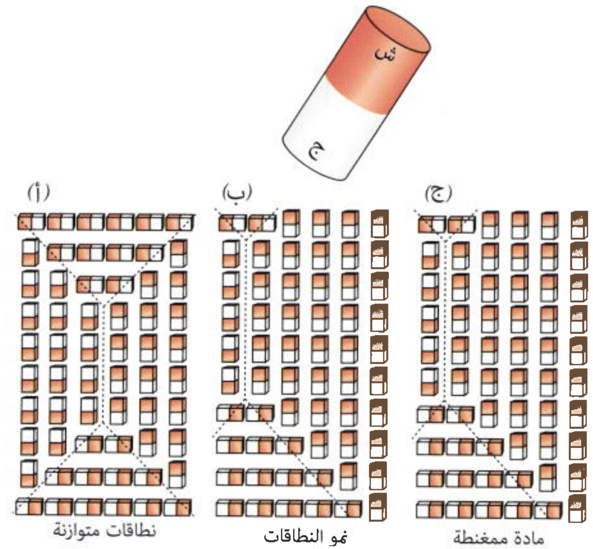
في حين يستطيع مغنطيسان على شكل أزرار أن تدفع أو تجذب بعضها، ماذا يحدث لو كان عندك واحد فقط؟ الطريقة الأسهل لمشاهدة القوى المغنطيسية هي أن تمسك ذلك المغنطيس الوحيد بالقرب من ثلاجتك أو قطعة حديدية أو فولاذية أخرى. سينجذب المغنطيس نـحو الثلاجة. لكن إذا قلبت المغنطيس الزري، ظناً منك أنه الآن سيتنافر مع الثلاجة، فإنه سيخيب ظنك. فبالرغم من أنه من الواضح أن الثلاجة هي مغنطيسية، إلا أن مغنطيسيتها تستجيب للمغنطيس الزري بحيث يتجاذب الجسمان دائما.

في الواقع، سلوك الثلاجة ليس غامضا على الإطلاق. يتكون حديد الثلاجة من أعداد كبيرة جدا من المغنطيسات المجهرية، كل منها لها أقطاب شمالية وجنوبية متكافئة (شكل ٣,١,١١). في الوضع الطبيعي، تكون كل من هذه الثنائيات القطبية المغنطيسية الفردية موجهة بشكل شبه عشوائي (شكل ٣,١,١١ أ)، بحيث لا تُظهر الثلاجة أي مغنطيسية إجمالية. ولكن عندما تقرّب قطباً واحداً من أقطاب المغنطيس الزري إلى الثلاجة، فإن مغنطيسات الثلاجة المجهرية تتغير من حيث الحجم والشكل والاتجاه (شكل ٣,١,١١ ب). إجمالا، تنزاح الأقطاب المعاكسة قريبا من قطب المغنطيس الزري وتنزاح الأقطاب المتشابهة بعيدا عن قطب المغنطيس الزري. يُنشئ الحديد استقطاباً مغنطيسياً وتبعا لذلك يجذب قطب المغنطيس الزري.

يظل هذا الاستقطاب قويا فقط إذا ظل قطب المغنطيس الزري قريبا. عندما تزيل المغنطيس الزري، معظم المغنطيسات المجهرية في الحديد تعود لترتيبها شبه العشوائي ويقل الاستقطاب المغنطيسي للحديد أو يختفي. وإذا أحضرت بعدها قطب المغنطيس الزري الآخر بالقرب من الثلاجة، فإن حديدها يُنشئ استقطاباً مغنطيسياً معاكساً ومرة أخرى يجذب قطب المغنطيس الزري. فبغض النظر عن أي قطب أو أي تشكيلة من الأقطاب التي تجلبها قريبا من الثلاجة، فإن حديد الثلاجة سيُستقطب بالطريقة الصحيحة لجذب تلك الأقطاب.

إذا جرّبت هذه الخدعة بسطح من البلاستيك أو الألمونيوم، فإن المغنطيس الزري لن يلتصق. ما الشيء المميز في الفولاذ والذي يسمح له لتكوين مثل هذا الاستقطاب المغنطيسي القوّي؟ الإجابة هي أن الفولاذ المعتاد، مثل مكونه الحديد، هو مادة فرومغنطيسية (مغنطيسية حديدية) – أي هي مغنطيسية نشطة عند مستواها الذري.

لفهم الفرومغنطيسية، يجب أن نبدأ بالنظر في الذرات والجسيمات دون الذرية التي تُبنى منها: أي الإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات. لأسباب معقدة، جميع تلك الجسيمات دون الذرية لها ثنائية قطبية مغنطيسية، خصوصا الالكترونات، وكثيراً ما



شكل ٣،١،١١: (أ) الأعداد الكبيرة من المغنطيسات المجهرية في الحديد أو الفولاذ تكون مرتبة في العادة عشوائيا بعض الشيء. (ب) ولكن عندما يوجد قطب مغنطيسي قوي بالقرب، فإن تلك المغنطيسات المجهرية تعيد ترتيب نفسها لكي تجذبه. في المواد المغنطيسية الرخوة، تكون إعادة الترتيب هذه مؤقتة. (ج) ولكن في المواد المغنطيسية الصلدة تظل ممغنطة حتى بعد ابتعاد القطب الخارجي بفترة طولية.

تظهر هذه المغنطيسية في الذرات التي تتشكل منها. بالرغم من ميل هذه الجسيمات دون الذرية للاقتران مع الترتيب المعاكس بحيث تلغي ثنائيتها القطبية المغنطيسية بعضها، إلا أن معظم الذرات المعزولة لها ثنائيات قطبية مغنطيسية ذات شأن.

لكن في حين معظم الذرات هي مغنطيسية ذاتيا، إلا أن معظم المواد ليست كذلك. وذلك لأن جولة أخرى من الاقتران والإلغاء تحدث عندما تتجمع الذرات لتكوّن مواداً. فهذه الجولة الثانية من الإلغاء تكون في الغالب فعّالة جدا بحيث يمكنها إلغاء المغنطيسية تماما عند المستوى الذري. المواد مثل الزجاج، أو البلاستيك، أو الجلد، أو النحاس، أو الألومنيوم لا تحتفظ بأي مغنطيسية عند المستوى الذري على الإطلاق ولن يلتصق مغنطيسك الزري بها. حتى معظم الفولاذ المقاوم للصدأ يكون لامغنطيسياً.

ولكن هناك بعض المواد التي تتجنب هذا الإلغاء الكامل وبالتالي تستطيع أن تظل ممغنطة عند المستوى الذري. أهم هذه المواد هي المواد الفرومغنطيسية، وهي صنف من المواد المغنطيسية يشمل الفولاذ والحديد الاعتيادي. فإذا فحصت منطقة صغيرة من الفولاذ الفرومغنطيسي، ستجد أنه مكوّن من العديد من المناطق المجهرية أو النطاقات المغنطيسية والتي هي مغنطيسية طبيعيا ولا يمكن إزالة مغنطيسيتها (شكل 3.1.11 أ). فداخل النطاق الواحد، يكون جميع الثنائيات القطبية المغنطيسية عند المستوى الذري مصطفة وتعطي سوية النطاق الكلي محصلة ثنائية قطبية مغنطيسية ذات شأن.

في حين أن الفولاذ المألوف له هذه النطاقات المغنطيسية بشكل دائماً، إلا أن التفاعلات المغنطيسية توجه النطاقات القريبة بحيث تعارض ثنائياتها القطبية المغنطيسية بعضها وتُلغى، فتوازن المغنطيسات المجهرية بعضها البعض بشكل جيد بحيث يظهر الفولاذ لامغنطيسياً. هذا سيئ جدا؛ لأن صالة عرض الأجهزة الكهربائية ستكون مكانا أكثر تشويقا للزيارة إذا لم يكن الإلغاء جيداً بهذا الشكل.

لكن عندما تجلب قطباً مغنطيسياً قوّياً بالقرب من الفولاذ (شكل ٣،١،١١ ب)، فإن النطاقات الفردية تنمو أو تنكمش، اعتمادا على طريقة توجيهها المغنطيسي، ويصبح الفولاذ ممغنطاً (شكل ٣،١،١١ ج). لا تتحرك الذرات ذاتها أثناء هذه العملية؛ فالتغير هو فقط إعادة توجيه الثنائيات القطبية المغنطيسية في المستوى الذري. النطاقات التي تجذب قطب مغنطيسك الزري تنمو بينما النطاقات التي تتنافر معه تنكمش فيلتصق المغنطيس الزري بالثلاجة.

تحقق من فهمك #٢: الأربطة التسلسلية (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

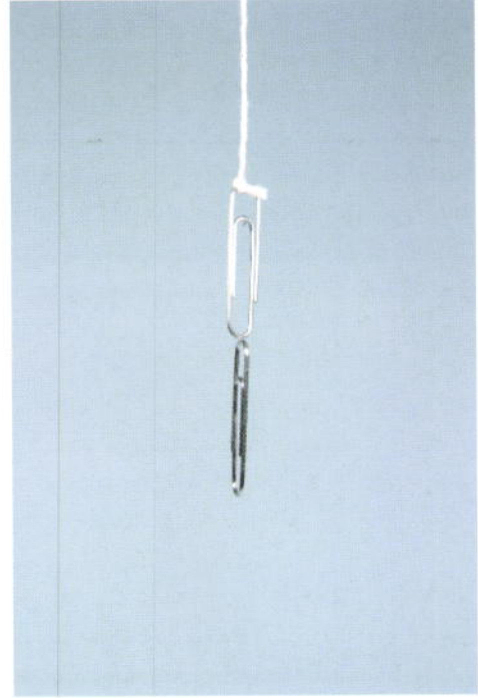
إذا لامست القطب الشمالي لمغنطيس دائم بطرف مشبك ورقي فولاذي، سيصبح طرف المشبك الآخر ممغنطاً. ما القطب الذي سيكون لدى الطرف الآخر؟

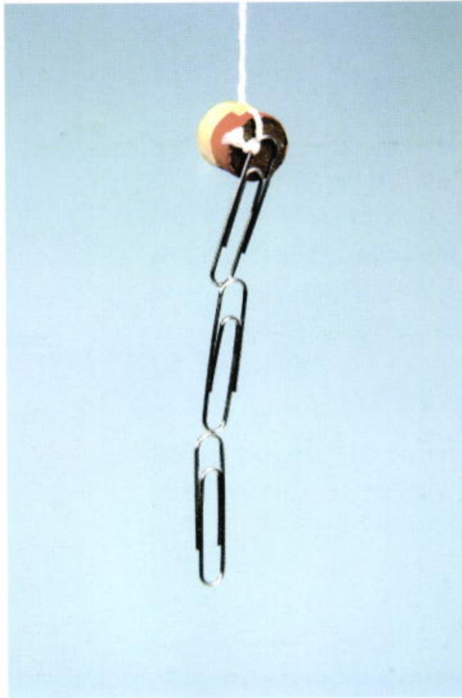
الشرائح البلاستيكية الممغنطة وبطاقات الائتمان

عندما تزيل مغنطيسك الزري من الثلاجة، يعود الفولاذ إلى حالته اللامغنطيسية الأصلية - يصبح مُزال المغنطيسية. حسنا، تقريبا مُزال المغنطيسية. فعملية إزالة المغنطيسية ليست مثالية تماما لأن بعض النطاقات تعلق. وفي حين القوى المغنطيسية داخل الفولاذ تُفضّل عودة كاملة إلى الحالة اللامغنطيسية الظاهرية، إلا أن القوى الكيميائية يمكن أن تجعل من الصعب على النطاقات أن تنمو أو تنكمش. تُفصل النطاقات المتجاورة بجدران نطاقية - أي أسطح حدية بين اتجاه ترتيب مغنطيسي واتجاه آخر. هذه الجدران النطاقية يجب أن تتحرك إذا غيّرت النطاقات حجمها. ولكن يمكن للعيوب والشوائب في الفولاذ أن تتفاعل مع جدار نطاق وتمنعه من التحرك. عندما يحدث ذلك، يفشل الفولاذ في إزالة مغنطيسيته بشكل تام (شكل ٤،١،١١). ولإزالة آخر أثر للمغنطيسية من الفولاذ، يجب أن تُساعد جدران النطاقات على التحرك، بواسطة حرارة أو صدمة ميكانيكية في العادة.

المادة المغنطيسية الرخوة هي التي تزيل مغنطيسيتها بنفسها بسهولة عندما تُزال جميع الأقطاب القريبة. الحديد الصافي كيميائياً، والذي له عيوب وشوائب قليلة، هو مادة مغنطيسية رخوة - سهل مغنطته وسهل إزالة المغنطة. المادة المغنطيسية الصلدة هي التي لا تزيل مغنطيسيتها بنفسها بسهولة وتميل للمحافظة على أي ترتيب للنطاقات يُفرض عليها عن طريق آخر قطب قوي قريب تتعرض له (شكل ٣،١،١١ ج). مغنطيسك الزري مصنوع من مادة مغنطيسية صلدة!

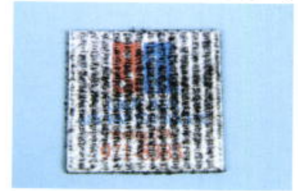
بإذن لو بلومفيلد





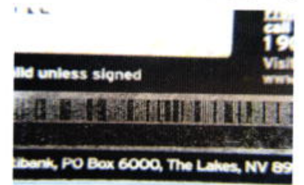
شكل ٤،١،١١: (أ) بالرغم من أن هذه المشابك الورقية كانت ابتداء لامغنطيسية، إلا أن قطب مغنطيس دائم قوي قام بمغنطتها كسلسلة. (ب) بعد إزالة المغنطيس المغنط، تحافظ المشابك على بعض من مغنطيسيتها.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٥,١,١١: تُشكّل برادة الحديد جسوراً بين الأقطاب المغنطيسية لهذه الشريحة البلاستيكية المغنطيسية.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٦,١,١١: تكشف برادة الحديد عن مواقع الأقطاب المغنطيسية على الشريط المغنطيسي في بطاقة الائتمان هذه. تُخزّن المعلومات كمواقع تلك الأقطاب.

المادة في مغنطيسك الزري هي فرومغنطيسية (أو إلى حد بعيد فرومغنطيسية) مثل الفولاذ. ولكن على خلاف الفولاذ، فإن نطاقات مغنطيسك الزري لا تنكمش أو تنمو بسهولة. أثناء تصنيعها، تم مغنطة المغنطيس الزري بتعريضه لتأثيرات مغنطيسية قوية بحيث أعادت ترتيب نطاقاته لإعطائه أقطاباً مغنطيسية دائمة، فله الآن قطب شمالي في وجه وقطب جنوبي في الآخر. ما لم تُعرّض المغنطيس الزري لتأثيرات مغنطيسية قوية جدا أو تسخّنه أو تضربه بعنف، فإنه سيحافظ على مغنطيسيته الحالية إلى الأبد تقريباً. من هذا الوجه، المغنطيس الزري هو مغنطيس دائم.

ليس كل المغنطيسات الدائمة بسيطة مثل المغنطيسات الزرية. فاعتمادا على طريقة مغنطتها، يمكن أن تكون مواقع أقطابها الشمالية والجنوبية في أماكن غير متوقعة أو حتى يكون لها أكثر من زوج من الأقطاب. الشرائح المغنطيسية البلاستيكية هي مثال جيّد للمغنطيسات المتعددة الأقطاب: كل منها له نمط متكرر من الأقطاب المتبادلة على امتداد طوله. تتفاوت هذه الأنماط، لكن معظمها لها أقطاب تكوّن أشرطة متوازية تبادلية. يمكنك أن تجد هذه الأشرطة بجعلها تستقطب وتجذب برادة الحديد (شكل ٥,١,١١) أو بجعل شريحتين مغنطيسيتين متماثلتين تنزلقان عبر بعضها. ستتجاذب الشريحتان وتلتصق ببعضها بقوة عندما تصطف الأقطاب المتعاكسة مقابلة لبعضها. وستتنافران عندما تزيح أحد المغنطيسين بحيث تصطف الأقطاب المتشابهة أمام بعضها.

إن مقدرة المادة المغنطيسية الصلدة على «تذكّر» مغنطيسيتها يمكن أن تكون مفيدة في حفظ المعلومات. فما أن تتمغنط المادة بطريقة معينة لكي تمثّل معلومة، فإنها ستحافظ على مغنطيسيتها والمعلومات المرتبطة بهذه المغنطيسية إلى أن يمغنطها شيء آخر بشكل مختلف. يُشكّل حفظ المعلومات في المواد المغنطيسية الصلدة الأساس لمعظم طرق التسجيل أو التخزين المغنطيسي، بما في ذلك الأشرطة المغنطيسية على بطاقات الائتمان، والأشرطة المغنطيسية، وأقراص الكمبيوتر، وذاكرة الوصول العشوائي المغنطيسية (Magnetic Random Access Memory MRAM) (شكل ٦,١,١١).

تحقق من فهمك # ٣: الآن دور قلب الوجه (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا أحضرت قطباً جنوبياً لمغنطيس كبير وقوّي بالقرب من القطب الشمالي لمغنطيس صغير وضعيف تمسكه في مكانه، ما الذي سيحدث لذلك المغنطيس الصغير؟

البوصلات

إذا كنت قد قضيت وقتا في السير في الجبال، فمن المحتمل أنك تمتلك بوصلة مغنطيسية. مثل المغنطيس الزري، فإن إبرة تلك البوصلة هي مغنطيس دائم بسيط بقطب شمالي مغنطيسي واحد وقطب جنوبي مغنطيسي واحد. تساعد هذه الإبرة على معرفة الاتجاهات لأن الأرض ذاتها لها ثنائي قطبي مغنطيسي وهذا بدوره يؤثر على اتجاه الإبرة: يميل القطب المغنطيسي الشمالي للإبرة للإشارة إلى الشمال دائما.

من الآن يمكننا إدراك ما الذي يجب أن يكون موجوداً في القطب الشمالي الجغرافي للكرة الأرضية: قطب مغنطيسي جنوبي. الجذب من ذلك القطب المغنطيسي الجنوبي هو ما يسحب القطب الشمالي المغنطيسي للبوصلة نحو الشمال. ولكن القصة الكاملة أكثر تعقيدا. للبدء، تقع الأقطاب المغنطيسية الأرضية في الحقيقة تحت سطح الأرض بكثير وليست مصطفة بشكل مثالي مع الأقطاب الجغرافية. لتعقيد الأمور أكثر، فإن المواد النشطة مغنطيسيا الموجودة في كل شيء من الجبال البعيدة إلى المباني القريبة تفرض تأثيراتها المغنطيسية على إبرة البوصلة. فإجمالا، تستجيب إبرة البوصلة لتأثيرات عدد لانهائي من الأقطاب المغنطيسية، سواء قريبة

أم بعيدة. وإدراكا لصعوبة جمع كل هذه التأثيرات الفردية، فإنه من الأفضل أن ننظر لإبرة البوصلة على أنها تتفاعل مع شيء محلي: مجال مغنطيسي - وهو خاصية للفراغ تبذل قوة مغنوستاتيكية على قطب. وبناء على هذا المنظور الجديد، فإن إبرة البوصلة تستجيب للمجال المغنطيسي المحلي، مجال يتكوّن من جميع الأقطاب المغنطيسية المحيطة.

مثل ما هو الحال في المجال الكهربائي، يظهر المجال المغنطيسي هنا وكأنه يعمل كوسيط فحسب: تنتج العديد من الأقطاب مجالا مغنطيسيا وهذا المجال المغنطيسي يؤثر على إبرة بوصلتنا. ولكن كما سنرى، إن المجال المغنطيسي هو أكثر من مجرد وسيط أو خيال، بل هو حقيقي فعلا ويمكن أن يوجد في الفراغ، مستقلا عن الأقطاب التي تنتجه. ومثل ما أن المجالات الكهربائية يمكن أن تتكوّن من أشياء غير الشحنة، فكذلك المجالات المغنطيسية يمكن أن تتكوّن من أشياء غير القطب.

يقيس المجال المغنطيسي عند موضع معيّن القوة المغنوستاتيكية التي تواجهها وحدة من قطب شمالي خالص إذا تم وضعها عند ذلك الموضع. وأكثر تحديدا، فإن القوة المغنوستاتيكية تساوي حاصل ضرب القطب في المجال المغنطيسي وتشير في اتجاه ذلك المجال المغنطيسي. يمكننا كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية:

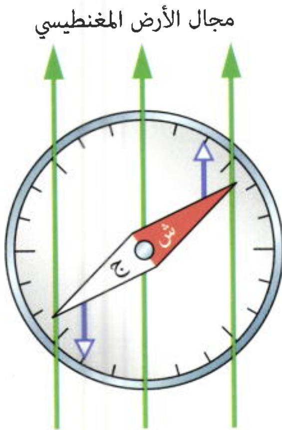
القوة = القطب × المجال المغنطيسي (٢,١,١١)

ورمزيا: $F=pB$

وفي لغة الحياة اليومية: إذا وضعت مغنطيساً قوياً في مجال مغنطيسي كبير، توقع أن تُدفع نـحو مكان ما.

حيث أن اتجاه القوة هو في اتجاه المجال المغنطيسي. ولكن لاحظ أن مقداراً سالباً من القطب (قطب جنوبي) يواجه قوة معاكسة للمجال المغنطيسي. وحدة المجال المغنطيسي في النظام العالمي SI هي نيوتن - لكل- أمبير - متر، وتسمى أيضا تسلا (اختصارا T).

المجال المغنطيسي للأرض ضعيف نسبيا، وهو حوالي 0.00005T في اتجاه شمالي تقريبا. (للمقارنة، فإن المجال بالقرب من مغنطيسك الزري قد يكون 0.1T أو أكثر.) ويدفع المجال الأرضي القطب الشمالي لإبرة البوصلة إلى الشمال والقطب الجنوبي إلى الجنوب (شكل ٧,١,١١). ما لم تكن إبرة البوصلة مصطفة تماما مع ذلك المجال، فإنها تواجه عزماً وتخضع لتسارع زاوي. بما أن مُرتكز الإبرة يسمح لها فقط بالدوران في المستوى الأفقي وتواجه احتكاكاً طفيفاً حينما تدور، فإن الإبرة تستقر بعد وقت قصير بقطبها الشمالي مشيرا في اتجاه الشمال. وإذا سمح مُرتكز الإبرة لها بأن تدور رأسيا إضافة إلى أفقيا، فإن القطب الشمالي للإبرة سينخفض للأسفل في النصف الشمالي للكرة الأرضية ويرتفع للأعلى في النصف الجنوبي للكرة الأرضية. عموما، تقلل الإبرة من طاقتها المغنوستاتيكية الكامنة بالاتجاه نـحو المجال المغنطيسي المحلي وبالتالي تصبح في وضع اتزان مستقر عندما تتجه بتلك الطريقة. بعد عدة تأرجحات ذهابا وإيابا، ستشير إبرة بوصلتك في اتجاه المجال المغنطيسي المحلي، والمأمول أن يكون نـحو الشمال.



شـكل ٧,١,١١: تصطف إبرة بوصلة مع المجال المغنطيسي المحلي. يواجه قطبها الشمالي قوة مغنوستاتيكية في اتجاه المجال ويواجه قطبها الجنوبي قوة في اتجاه معاكس للمجال.

بما أن المجال المغنطيسي للأرض منتظم جدا في محيط بوصلتك، فإن دفعه على القطب الشمالي للإبرة نـحو الشمال يتوازن تماما مع دفعه على القطب الجنوبي للإبرة نـحو الجنوب فتواجه الإبرة محصلة قوة صفرية. لكن إذا قرّبت بوصلتك من مغنطيس زري، فإن المجال المغنطيسي المحلي لن يكون منتظما وقد تواجه الإبرة محصلة قوة. يُصبح المجال المغنطيسي أقوى بالقرب من أحد قطبي المغنطيس الزري وستواجه إبرة البوصلة محصلة قوة نـحو أو بعيدا عن ذلك القطب، اعتمادا على اتجاهه.

عندما تصطف الإبرة مع مجال غير منتظم - بقطبها الشمالي مشيراً في نفس اتجاه المجال المحلي - فإن القوى

المتعاكسة على قطبيها لن تتوازن وستواجه محصلة قوة في اتجاه ازدياد المجال. إذا كانت الإبرة مصطفة عكس المجال، فإنها ستواجه محصلة قوة في اتجاه تناقص المجال. عمليا، حينما تُقرّب البوصلة من مغنطيسك الزري، فإن إبرتها ستتمحور لتصطف مع المجال المحلي أولاً ثم ستجد نفسها تنسحب باتجاه ازدياد المجال، باتجاه أقرب قطب في المغنطيس الزري. يحدث الشيء نفسه عندما تُحضر مغنطيسين زريين سوية: كل منهما يتمحور ليصطف مع المجال المغنطيسي للآخر ثم يقفزان على بعضهما. فانتبه على أصابعك!

تُظهر قطعة من الفولاذ سلوكاً مشابهاً عندما تمسك بها بالقرب من مغنطيس زري: أي تصبح ممغنطة باتجاه المجال المغنطيسي المحلي ثم تجد نفسها تُسحب باتجاه ازدياد المجال، نـحو أقرب قطب للمغنطيس الزري. هكذا يُمسك المغنطيس الزري بأوراقك على الثلاجة!

تحقق من فهمك # ٤: البوصلة المجنونة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

تُمسك بإبرة بوصلتك بإحكام بحيث لا تتحرك ثم تحرك قطبها الشمالي بالقرب من القطب الشمالي لمغنطيس زري قوّي. هل ستواجه الإبرة قوة مغنوستاتيكية باتجاه المجال القوي أم المجال الضعيف؟

دقق في أرقامك #١: كن حذراً من مفتاح البراغي!

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٧)

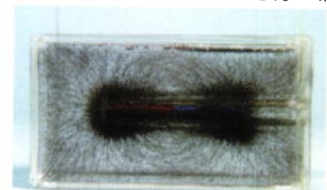
بالخطأ وضعتَ مفتاح براغٍ فولاذي طويل في مجال مغنطيس قوي مقداره 1T. يمغنط المجال مفتاح البراغي فيشكّل قطباً شمالياً مقداره 1000A·m عند طرفه القريب وقطباً جنوبياً له نفس المقدار عند طرفه البعيد. فقط الطرف القريب لمفتاح البراغي موجود في المجال الذي قدره 1T ويواجه قوة مغنطيسية. ما هي القوة التي يبذلها المجال على مفتاح البراغي وقطبه الشمالي؟

برادة الحديد والفيض المغنطيسي

تبدو المجالات المغنطيسية أنها مجردة؛ وسيكون مفيدا إذا أمكنك رؤيتها. من المدهش أنك تستطيع ذلك: فقط انثر برادة الحديد في المجال! بالرغم من أنك ستحتاج أن تدعم وزنها بورقة أو سائل، إلا أن نمطاً مثيراً سيتشكل. بالتصرف مثل إبر بوصلات صغيرة جدا، تتمغنط جسيمات الحديد على طول المجال المغنطيسي المحلي ثم تلتصق سوية، القطب الشمالي بالقطب الجنوبي، في خطوط طويلة تصف المجال المغنطيسي (شكل ٨,١,١١)!

ترسم هذه الخطوط خريطة المجال المغنطيسي بطريقة مثيرة. أولا: على كل نقطة في الخطوط، يشير الخط باتجاه المجال المغنطيسي المحلي. ثانيا: تتجمع الخطوط بكثافة أكبر حيث المجال المغنطيسي المحلي أقوى. بعبارة أخرى، تتبع الخطوط اتجاه المجال المغنطيسي المحلي ولها كثافة تتناسب مع ذلك المجال المحلي. هذه الخطوط التي تظهر تُعدّ مفيدة جدا لدرجة أن لها اسمها الخاص: خطوط الفيض المغنطيسي.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٨,١,١١: تُظهر برادة الحديد هذه، المدعومة من قبل سائل، خطوط الفيض المغنطيسي حول المغنطيس.

كثيراً ما تكون خطوط الفيض مفيدة عندما نستكشف مجالاً مغنطيسياً. إذا كنت تدرس المجال المغنطيسي في مساحة كبيرة، فمن المحتمل أنك لا تريد استخدام برادة الحديد. بدلا من ذلك، يمكنك الإمساك ببوصلة بيدك والمشي في الاتجاه الذي تشير إليه الإبرة - اتجاه المجال المغنطيسي. المسار الذي ستتبعه مشيا بقيادة هذه

البوصلة هو خط الفيض المغنطيسي. إذا كررت هذه الرحلة من نقاط ابتدائية مختلفة، فسوف تستكشف المجال المغنطيسي كاملا، بكل خطوط الفيض. بما أن المجال المغنطيسي يميل للإشارة بعيدا عن الأقطاب الشمالية ونحو الأقطاب الجنوبية، فإن هذه الجولات في العادة ستأخذك من الأقطاب الشمالية إلى الأقطاب الجنوبية. وفي الحقيقة، بالنسبة لمغنطيساتنا الدائمة، فإن كل خط فيض مغنطيسي يبدأ من قطب شمالي وينتهي عند قطب جنوبي.

تلك الملاحظة الأخيرة حول خطوط الفيض هي عامة جداً: هي لا تبدأ ولا تنتهي أبدا عند أي شيء غير قطب مغنطيسي. ففي حين تخرج خطوط الفيض في جميع الاتجاهات من قطب شمالي وتتجمع من جميع الاتجاهات عند قطب جنوبي، فإن خطوط التدفق لا تبدأ ولا تنتهي أبدا في الفراغ. إذا كنت تتبع خط فيض مغنطيسي ببوصلتك، فإنك إما أن تصل إلى قطب جنوبي أو تمشي إلى الأبد!

إن احتمالية ذلك المشي الأبدي مقلق بعض الشيء؛ إذا لم ينتهِ خط الفيض الذي تتبعه عند قطب، فما الذي أنشأ مجاله المغنطيسي؟ تكشف الإجابة عن ارتباط وثيق بين المغنطيسية والكهرباء: بعض المجالات المغنطيسية لا تنتج من الأقطاب المغنطيسية على الإطلاق، بل تنتج من الكهرباء! لرؤية كيف يكون ذلك ممكنا، دعنا ننظر في مغنطيس منزلي آخر مألوف: المغنطيس الكهربائي في جرس الباب المعتاد.

تحقق من فهمك # ٥: بناء الجسور (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا نثرت برادة حديد على الشريط المغنطيسي في بطاقة ائتمان، فإن نمطاً من جسور الحديد الصغيرة سيتشكل. أين الأقطاب المغنطيسية بالنسبة لتلك الجسور؟

أجراس الباب الكهربائية والمغنطيسات الكهربائية

يستخدم جرس الباب الكهربائي التقليدي مغنطيساً وزنبركاً لدفع قطعة من الحديد خلال جرسين، «دِنغ-دونغ». فعندما تضغط زر جرس الباب، فأنت تغلق دائرة كهربائية، والتيار الكهربائي الناتج يدفع الحديد دفعا مغنطيسيا إلى الجرس الأول، «دِنغ». وعندما ترفع اصبعك عن الزر، فإنك تفتح الدائرة الكهربائية، فتوقف التيار ومغنطيسيته بحيث يستطيع الزنبرك أن يدفع الحديد عائدا إلى الجرس الثاني، «دونغ».
الخبر العظيم هنا هو أن التيارات الكهربائية يمكنها أن تنتج قوى مغنطيسية. في الحقيقة، ليس هناك أي شيء اختياري في هذا الارتباط: التيارات الكهربائية هي مغنطيسية. وأكثر تحديدا، تنتج الشحنات الكهربائية المتحركة مجالا مغنطيسياً.

الارتباط الأول بين الكهرباء والمغنطيسية

تنتج الشحنة الكهربائية المتحركة مجالا مغنطيسيا.

تخيّل تفاجؤ الفيزيائي الدنماركي هانز كريستيان أورستيد (١٧٧٧-١٨٥١) عندما لاحظ في عام ١٨٢٠ أن التيار في سلك تسبب في دوران إبرة بوصلة قريبة. فإلى تلك اللحظة، كانت الكهرباء والمغنطيسية قد ظهرت كظواهر منفصلة. ولقد ألهمت تجربة أورستيد الفيزيائي الفرنسي أندريه-ماري أمبير (انظر ٥'). فقضى سبع سنوات في دراسة العلاقات بين الكهرباء والمغنطيسية، وبدأ بالثورة التي وحّدت في نهاية المطاف بينهما في إطار مفهوم واحد شامل.

عندما نستخدم برادة الحديد لإظهار خطوط الفيض المغنطيسي المحيطة بسلك طويل مستقيم حامل لتيار كهربائي، فنحن أيضا سنُفاجأ (شكل ٩,١,١١). فخطوط الفيض هذه تُشكّل دوائر متحدة المركز حول السلك،

٥' تعلم الفيزيائي الفرنسي أندريه-ماري أمبير (١٧٧٥ - ١٨٣٦م) تعلما ذاتيا قبل الثورة الفرنسية، والتي تم إعدام والده خلالها، وأصبح معلم علوم في عام ١٧٩٦م. خدم أمبير كأستاذ فيزياء أو رياضيات في العديد من المدن قبل أن يستقر في جامعة باريس في عام ١٨٠٤م. في عام ١٨٢٠م، وبعد أسبوع فقط من عِلمه بتجربة أورستيد، التي أظهرت أن التيار الكهربائي يتسبب في انحراف إبرة بوصلة، نشر أمبير بحثاً شاملا عن الموضوع. من الواضح أنه كان يُفكّر حول هذه الأفكار مدة طويلة.

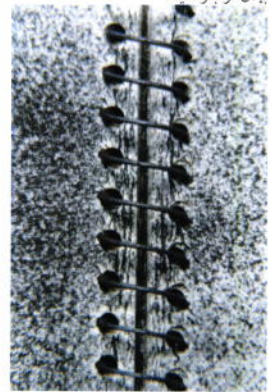
بإذن لو بلومفيلد



شكل ٩,١,١١: تُظهر برادة الحديد أن خطوط الفيض حول سلك حامل للتيار تُشكّل حلقات متحدة المركز حول ذلك السلك.

والتي يزداد التباعد بينها كلما زاد البعد عن السلك. السلك هو مغنطيس كهربائي - أداة تُصبح مغنطيسية عندما تحمل تياراً كهربائياً. ولكن لأن المغنطيس الكهربائي ليس له أقطاب مغنطيسية حقيقية، فإن خطوط الفيض المغنطيسي لا يمكنها أن تمتد من قطب شمالي إلى قطب جنوبي. بدلا من ذلك، كل خط فيض لمغنطيس كهربائي هو حلقة مغلقة. إذا قمت بالمشي على طول أحد خطوط الفيض هذه باستخدام توجيه البوصلة، فإنك ستقتفي آثار خطواتك مرة بعد أخرى.

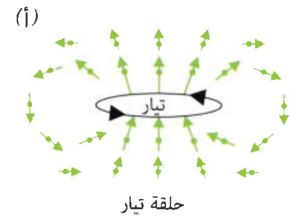
بما أن خطوط الفيض تتجمع بكثافة أكثر بالقرب من سطح السلك الحامل للتيار، فإن هذا هو موضع أقوى مجال مغنطيسي. بتذكر أن قطعة حديد تنجذب باتجاه ازدياد المجال المغنطيسي، فإننا نرى أن السلك سيجذب الحديد إليه كلما حمل تيارا.
ولكن المجال المغنطيسي حول سلك حامل لتيار هو ضعيف نوعاً ما، لذا فإن سلك جرس الباب العملي يلف على شكل ملف لتركيز وتقوية مجاله. وفي حين أن المجال المغنطيسي حول ملف حامل لتيار يكون معقداً، إلا أنه يمكننا استخدام برادة الحديد لإظهاره (شكل ١٠،١،١١). من المدهش أن خطوط الفيض خارج الملف تشابه تلك التي تكون خارج مغنطيس زري ذي أبعاد متشابهة (شكل ١١،١،١١). فيبدو ذلك كما لو أن للملف قطباً شمالياً عند أحد الطرفين وقطباً جنوبياً عند الطرف الآخر! ولكن لأنه لا توجد هناك أقطاب حقيقية، فإن خطوط الفيض لا تنتهي في أي مكان. بدلا من ذلك، تستمر خلال منتصف الملف وتُشكّل حلقات كاملة.


بإذن لو بلومفيلد

شكل ١٠،١،١١: تُظهر برادة الحديد أن خطوط الفيض تمر بشكل مباشر خلال ملف حامل لتيار كهربائي ومن ثم تعود خارجه، وتشابه في ذلك خطوط الفيض حول قضيب مغنطيسي له نفس الشكل.

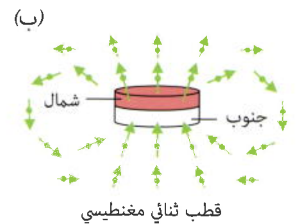
عندما يتدفق التيار خلال الملف، فإن الحديد القريب يجد نفسه قد تمغنط على طول المجال الكهربائي المحلي ثم يُجذب نحو ازدياد المجال - نحو خطوط الفيض المتجمعة بكثافة عند طرف الملف. لكن لماذا تتوقف هناك؟ بما أن خطوط الفيض تستمر إلى داخل الملف وتزداد كثافة تجمعها في الداخل، فإن الحديد سيُجذب إلى الداخل نحو مركز الملف!

(أ)



حلقة تيار

(ب)



قطب ثنائي مغنطيسي

شكل ١١،١،١١: (أ) المجال المغنطيسي حول سلك حلَقي حامل لتيار يشير للأعلى خلال الحلقة وللأسفل حول خارج الحلقة. ويشير سهم المجال المغنطيسي المار خلال كل نقطة خضراء إلى مقدار واتجاه القوة التي سيواجهها قطب شمالي اختباري عند موضع النقطة. (ب) المجال الناتج من مغنطيس زري ذي قطبين يكاد يكون متماثلا لذلك الخاص بالحلقة.

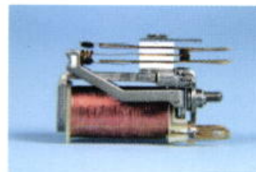
هذه طريقة عمل جرس الباب. فعندما تضغط زر جرس الباب، يتدفق تيار خلال ملف سلكي ويجذب المجال المغنطيسي الناتج قضيباً من الحديد إلى مركز ذلك الملف. وفي الوقت الذي يصل فيه القضيب إلى المركز، فإن جزءاً منه يضرب الجرس الأول. ثم عندما تفتح المفتاح، فيتوقف التيار ومغنطيسيته، فإن زنبركاً يدفع قضيب الحديد خارج الملف فيضرب الجرس الثاني. هذان الجرسان يكونان الصوت «دنغ-دونغ» المألوف!

بينما يتدفق التيار خلال الملف وفي وجود قضيب الحديد داخله، فإن الجسمين يتصرفان وكأنهما مغنطيس كهربائي واحد قوي. المجال المغنطيسي المحيط بالجسمين هو مجموع المجال المغنطيسي المتواضع للملف والمجال الأقوى للحديد الممغنط. ففي الواقع، التيار في الملف يمغنط الحديد، ويكوّن الحديد بعد ذلك معظم المجال المغنطيسي المحيط. إن المغنطيسات الكهربائية العملية، التي تتحكم بمفاتيح وصمامات فُرْنك ومكيف هوائك والتي يمكنها أن ترفع سيارات في ساحة الخردة، تستخدم بالعموم الحديد أو مواداً مشابهة لكي تعزز بشكل كبير المجال المغنطيسي الناتج من تيار في ملف سلكي (شكل ١٢،١،١١).

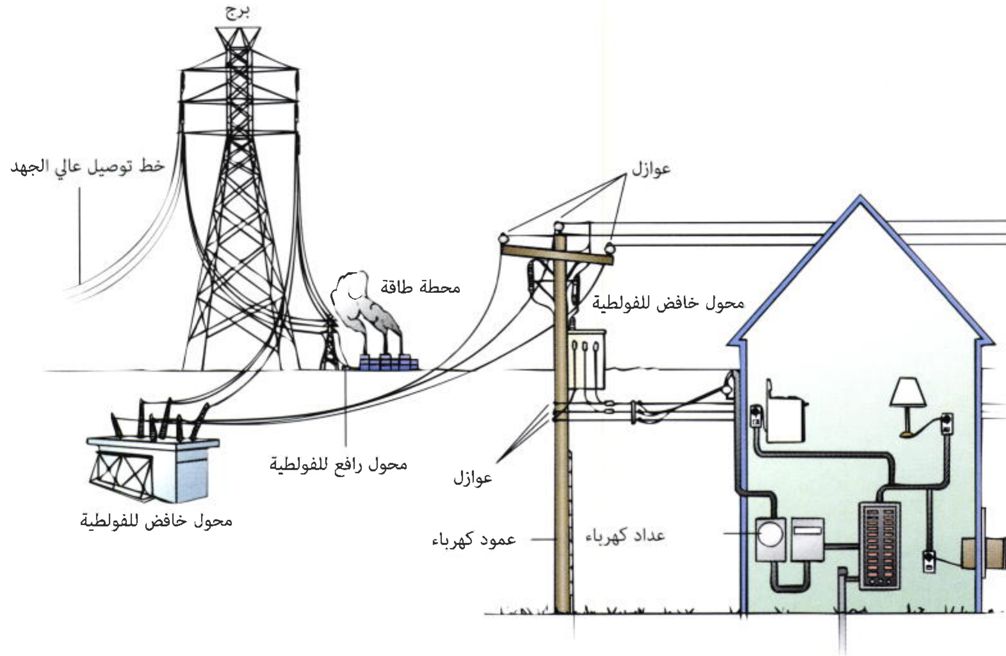
تحقق من فهمك #٦: تقنية التيار

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

في تصوير الرنين المغنطيسي (MRI)، يُغمر المريض في مجال مغنطيسي شديد. يتكوّن هذا المجال كاملاً بدون مغنطيسات دائمة أو حتى حديد. كيف يمكن أن يكون ذلك ممكنا؟


بإذن لو بلومفيلد

شكل ١٢،١،١١: يُتحكم بهذا المفتاح الكهربائي بواسطة مغنطيس كهربائي ويُسمى مرحل أو حاكم (relay).



١١-٢ توزيع الطاقة الكهربائية

إن الكهرباء شكل مفيد عمليا ومريح من أشكال الطاقة المنتظمة. وبسبب أنها تصل لمنازلنا ومكاتبنا كمنافع، فإننا بالكاد نفكر فيها عدا وقت دفع الفواتير. فالأسلاك التي تجلبها لنا لا تُسد ولا تحتاج تنظيفاً وتعمل بشكل مستمر ما عدا إذا كان هناك عطل في الطاقة، أو فاصمة أو صهيرة *(fuse)* محترقة، أو خطأ في قاطع الدوائر الكهربائية.

كيف تصل الكهرباء إلى منازلنا؟ في هذا القسم، سوف ننظر في المشاكل المرتبطة بتوزيع الكهرباء بعيدا عن محطة الطاقة التي تتولد فيها. ولفهم هذه المشاكل، سنفحص الطرق التي تؤثر بها الأسلاك على الكهرباء ونرى كيف تنتقل الطاقة الكهربائية ويُعاد ترتيبها بواسطة أجهزة تُسمى محوّلات.

أسئلة للتفكير

لماذا تستخدم أنظمة توزيع الطاقة تياراً متردداً؟ ما هو الغرض من أسلاك الجهد العالي؟ لماذا تضع شركة الطاقة أجهزة كهربائية كبيرة على الأعمدة بالقرب من المنازل أو على الأرض بالقرب من الأحياء؟ ما هي مميزات وعيوب الطاقة الكهربائية للجهد *120 V* مقابل *230V*؟

تجارب يمكن القيام بها

إن تجارب توزيع الطاقة الكهربائية خطرة جدا، لكن يمكنك ملاحظة الطرق التي تتوزع بها الطاقة الكهربائية في منطقتك. فإذا كانت منطقتك متصلة بشبكة طاقة كهربائية رئيسية، فستتمكن من إيجاد تسلسل هرمي كامل من مرافق تحويل الطاقة. يجب أن تسير الطاقة من محطة الطاقة إلى مدينتك خلال أسلاك جهد عالٍ، وهي في العادة موضوعة مرتفعة على أعمدة طويلة أو أبراج. هذه الأسلاك يجب أن تنتهي عند مرفق كبير لتحويل الطاقة، حيث توجد أجهزة عظيمة تحوّل الطاقة إلى خطوط طاقة ذات فولطيات منخفضة والتي تنتشر عبر مدينتك. في بعض المناطق، تكون هذه الأسلاك فوقية؛ وفي مناطق أخرى تكون تحت سطح الأرض. ولكن هذه الطاقة ليست جاهزة بعد للاستهلاك المنزلي. فهي تمر خلال مرحلة تحويل أخرى على الأقل قبل أن تصل المنازل الفردية.

كل خطوات التحويل هذه تحدث بواسطة محوّلات. ويمكنك أن تجد المحوّلات على شكل صناديق أو أسطوانات على الأعمدة أو على الأرض خارج المنازل. ففي المدن، كثيراً ما يتم وضع المحولات داخل المباني، بعيدا عن الأنظار. بالرغم من أنك قد تجد صعوبة في العثور على هذه المحولات، إلا أنها موجودة. في هذا القسم، سوف نرى لماذا هي ضرورية.

تحذير

الكهرباء خطرة، خصوصا إذا اشتملت على فولطيات مرتفعة. الخطر الرئيسي هو أن تياراً كهربائياً سيمر خلال جسمك في محيط قلبك ويسبب في اضطراب إيقاعه الطبيعي. في حين يتطلب الأمر تياراً كهربائياً بسيطاً فقط لإحداث مشكلة، إلا أن جلدك موصل رديء لدرجة أنه في العادة يمنع التيارات الضارة من المرور خلالك. ولكن الفولطيات المرتفعة يمكنها أن تدفع تيارات خطرة خلال جلدك وتعرضك للخطر. في حين يستلزم أن يكون جسمك جزءاً من دائرة كهربائية مغلقة لكي يستقبل صدمة، لكن لا تعتمد على غياب دائرة كهربائية ظاهرة لحمايتك من الإصابة – فالدوائر الكهربائية تميل للتشكل بطرق مدهشة عندما تلمس سلكا كهربائيا. كن أكثر حذرا كلما كنت بالقرب من فولطيات أكبر من 50 V، حتى وإن كانت بطاريات، أو عندما تكون قريباً من أي فولطية إذا كنت مبتلا أو كان جلدك متشققاً.

توزيع طاقة التيار المستمر

قد تكون البطاريات مناسبة لتشغيل الكشّافات الضوئية، ولكنها غير عملية في إضاءة المنازل. لقد كانت التجارب الأولية التي وضعت بطاريات في الأقبية مخيبة للآمال لأن طاقة البطاريات نفدت بسرعة واحتاجت لصيانة ومواد كيميائية جديدة بشكل متكرر جدا.

كان مصدر الكهرباء الأكثر توفيراً للمال هو المولدات الكهربائية التي تعمل على الفحم أو الزيت. فمثل البطاريات، تبذل المولدات شغلاً على التيارات الكهربائية المتدفقة خلالها ويمكنها أن توفّر القدرة الكهربائية اللازمة لإضاءة المنازل. ولكن في حين تنتج المولدات الكهرباء بتكلفة أقل من البطاريات، إلا أن النماذج الأولية منها كانت آلات كبيرة تحتاج إلى هواء طلق وعناية. وكان من اللازم بناء هذه المولدات بشكل مركزي، بوجود أشخاص للعناية بها ومداخن للتخلص من الدخان. هذا هو التوجه الذي اتخذه المخترع الأمريكي توماس ألفا أديسون (١٨٤٧-١٩٣١) في عام ١٨٨٢ عندما بدأ في إمداد مدينة نيويورك بالكهرباء. كل مولدات شركة أديسون للإنارة الكهربائية عملت مثل البطاريات الميكانيكية، منتجة تيارا مستمرا يُغادر المولّد دائماً خلال سلك ويعود إليه خلال سلك آخر. وضع أديسون مولّداته في مواقع مركزية ووصّل التيار من وإلى المنازل التي خدمها خلال أسلاك من النحاس. ولكن كلما بعُد المبنى عن المولّد، تطلب ذلك زيادة في سمك الأسلاك النحاسية. وذلك لأن الأسلاك تعيق تدفق التيار، وبجعلها أكثر سمكا يُسمح لها بحمل التيار بسهولة أكبر.

إن سمك السلك مهم لأن الأسلاك، مثل الفتيلة في مصباح الكشّاف الكهربائي التي درسناها في الفصل السابق، لها مقاومة كهربائية. وتوافقا مع قانون أوم (معادلة ٤،٣،١٠)، فإن الهبوط الفولطي خلال سلك يساوي مقاومته الكهربائية مضروبة في التيار المار خلاله. ففي حالة سلك موصل لتيار من محطة توليد الطاقة إلى المنزل، فإن اهتمامنا الأولي هو مقدار الطاقة التي يهدرها السلك كطاقة حرارية. يمكننا أن نحدد هذه الطاقة المهدرة بدمج قانون أوم مع معادلة الطاقة المستهلكة من قبل جهاز (معادلة ١،٣،١٠):

الطاقة المستهلكة = الهبوط الفولطي · التيار

= (التيار × المقاومة الكهربائية) · التيار

= التيار^2 × المقاومة الكهربائية

تتناسب الطاقة المهدرة في السلك مع مربع التيار المار خلاله! هذه العلاقة أصبحت واضحة جدا لأديسون عندما حاول أن يوسع أنظمته لتوزيع الطاقة الكهربائية. فكلما حاول أن يوصل تيارا أكثر عبر سلك معين، فقد طاقة أكبر كحرارة. فمضاعفة التيار في السلك جعلت القدرة المهدرة أكثر بأربعة أضعاف.

حاول أديسون أن يقاوم هذا الفقد بخفض المقاومات الكهربائية للأسلاك. فاستخدم أديسون النحاس لأن الفضة هي الموصل الوحيد الأفضل منه في توصيل التيار. واستخدم أسلاكاً سميكة ليزيد من عدد الشحنات المتحركة. وأبقى الأسلاك قصيرة حتى لا يكون لديها مجال لهدر القدرة. هذا المتطلب لطول السلك أجبر أديسون على بناء محطاته لتوليد الطاقة

في محيط المدن التي خدمها. حتى مدينة نيويورك احتوت على العديد من محطات الطاقة المحلية. (للاطلاع على قصة مثيرة عن الأيام الأول لتاريخ القدرة الكهربائية، انظر[٢٥] .)

حاول أديسون أيضا أن يتجنب الهدر بتوصيل تيارات أصغر بفولطيات أعلى. وبما أن الطاقة الموصلة تساوي الهبوط الفولطي مضروبا في التيار (انظر معادلة ١,٣,١٠)، كان بإمكان أديسون أن يخفض التيار المتدفق خلال الأسلاك برفع الفولطية. بالرغم من أن تيارا أقل تدفق خلال كل منزل، إلا أنه مرّ بهبوط فولطي أكبر بحيث لم تتغير الطاقة الموصلة. ولكن الفولطيات العالية خطرة لأنها تميل لإحداث شرر حينما يقفز التيار خلال الهواء. كما أنها تنتج صدمات عنيفة عندما يتدفق التيار خلال جسدك. ففي حين يمكن معاملة الفولطيات العالية بأمان خارج المنزل، إلا أنها لا يمكن إدخالها إلى المنزل. لذا استخدم أديسون أعلى الفولطيات التي يمكن أن تسمح بها شروط السلامة.

بالرغم من أن العلماء اكتشفوا عدداً من المواد التي تفقد مقاومتها الكهربائية عند درجات الحرارة المنخفضة جدا لتصبح موصلات كهربائية مثالية أو موصلات فائقة (شكل ١,٢,١١)، إلا أن هذه الموصلات الفائقة مازالت غير عملية في أنظمة توزيع الطاقة الكهربائية. فاستخدام هذه الموصلات الفائقة محدود في استخدامات محلية مثل المغنطيسات الكهربائية الكبيرة والأجهزة الإلكترونية المتخصصة.

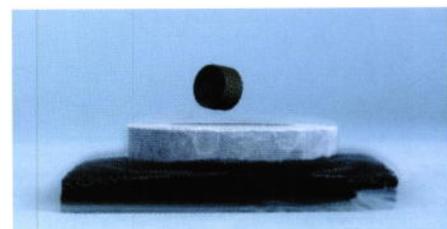
تحقق من فهمك #١: المشكلة في الطاقة الكهربائية بتيار مستمر (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا ضاعف أديسون طول أسلاك التوصيل مع إبقاء التيارات خلالها عند نفس القيمة، ماذا سيحدث للطاقة التي ستستهلكها؟

التعريف بالتيار المتردد

إن المشكلة الحقيقية في توزيع الطاقة الكهربائية عن طريق التيار المستمر (DC) هي أنه لا توجد طريقة سهلة لنقل الطاقة من دائرة تيار مستمر لأخرى. وبسبب أن المولّد والمصابيح الضوئية يجب أن تكون جزءاً من نفس الدائرة الكهربائية، فإن السلامة تتطلب أن تستخدم جميع الدائرة فولطيات منخفضة وتيارات عالية. بالتالي يُهدر توزيع الطاقة عن طريق التيار المستمر الكثير من طاقته في الأسلاك التي توصل كل الأجزاء ببعضها.

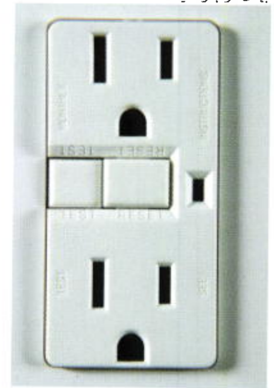
ولكن، كما سنرى قريبا، التيار المتردد (AC) يجعل من السهل نقل الطاقة من دائرة تيار متردد لأخرى، بحيث تستطيع الأجزاء المختلفة من نظام توزيع الطاقة من خلال التيار المتردد أن تعمل عند فولطيات مختلفة بتيارات مختلفة. والأكثر أهمية، أن الأسلاك التي تحمل الطاقة لمسافات طويلة هي جزء من دائرة ذات فولطية عالية وتيار منخفض وبالتالي تهدر طاقة قليلة.
التيار المتردد هو تيار يعكس اتجاهه بشكل دوري – أي يتبادل. على سبيل المثال، عندما تصل مصباح مكتبك بمقبس كهرباء يوفر تيار متردد وتفتحه، فإن التيار الذي يتدفق خلال فتيلة المصباح يعكس اتجاه سيره مرات عديدة كل ثانية.



بإذن لو بلومفيلد

شكل ١,٢,١١: تطفو أسطوانة مغنطيسية فوق سطح موصّل فائق عند درجة حرارة 78K. التيارات المتدفقة بحرية في الموصل الفائق تجعله مغنطيسيا وتتسبب في تنافره مع الأسطوانة المغنطيسية.

[٢٥] قناة اللوف هي أشهر مكب للنفايات السامة في الولايات المتحدة الأمريكية. أنشئ المكب في العشرينات من القرن العشرين في جزء مهجور من القناة التي بدأ ببنائها وليام ت. لوف في عام ١٨٩٢م. وقصد لوف من هذه القناة أن تصل بين الجزء العلوي والسفلي لأنهار نياجرا، حتى يمكن استخدام الماء الهابط في توليد طاقة كهربائية بتيار مستمر لمواطني شلالات نياجرا في نيويورك. ومع ظهور أنظمة نقل الطاقة بتيار متردد في عام ١٨٩٦م أصبحت القناة قليلة الفائدة، ولم يتم إنهاؤها إلى الآن.


بإذن لو بلومفيلد

شكل ٢,٢,١١: يتبع هذا المقبس الكهربائي المعايير الأمريكية للخدمة ذات فولطية 120V بتيار متردد 15A. الفتحات العريضة (يسار) محايدة، والفتحات الضيقة (يمين) حية، والفتحات المقوسة (منتصف) أرضية. يوفر هذا المقبس حماية (GFCI) (قاطع الدائرة عند الخلل الأرضي): إذا أخفق أي تيار غادر الطرف الحيّ في العودة للطرف المحايد، أو العكس بالعكس، فإن المقبس يُغلق فورا إلى أن يُعاد تشغيله. يحاكي زر الاختبار تسرب تيار وسيغلق المقبس إذا كان نظام الحماية فيه يعمل بشكل جيد.

تدفع شركة الكهرباء بهذا التيار المتردد خلال فتيلة المصباح بتعريضها لهبوط فولطي متردد - هبوط فولطي يعكس اتجاهه بشكل دوري. وكما قد تذكر من القسم ١٠-٣ عن الكشّافات الضوئية، فالتيار في الفتيلة الأومية يتدفق لأسفل تحدّر فولطي من الموجب إلى السالب، مثل تدحرج راكبي الدراجات لأسفل تحدّر ارتفاعي من الأعلى إلى الأسفل. في حين تُعرّض بطارية الكشّاف الضوئي فتيلة الكشّاف لهبوط فولطي ثابت وتحصل على تيار مستمر، فإن شركة الكهرباء تُعرّض فتيلة مصباحك لهبوط فولطي متردد وتحصل على تيار متردد.

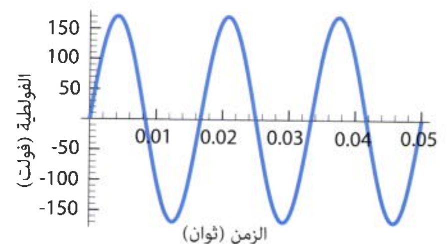
الفولطيات المترددة موجودة في أي مقبس كهربائي يوفر تيار متردد. في الولايات المتحدة الأمريكية، يقدم مقبس التيار المتردد المعتاد ثلاثة توصيلات: حي، ومحايد، وأرضي (شكل ٢,٢,١١). ففي المقبس المركب بشكل جيّد، فإن الفولطية المطلقة للمحايد تظل قريبة من 0V بينما الفولطية المطلقة للحيّ تتردد فوق وتحت 0V. أما الأرضي، والذي هو توصيل اختياري لغرض السلامة سنتحدث عنه لاحقا، يظل أيضا بالقرب من 0 V مطلق.

إن أحد طرفي فتيلة مصباحك متصل بالحيّ والآخر بالمحايد. بما أن التيار يتدفق دائما خلال الفتيلة من الفولطية الأعلى إلى الفولطية الأقل، فإنه يتدفق من الحيّ إلى المحايد عندما يكون للحي فولطية موجبة ومن المحايد إلى الحيّ عندما يكون للحيّ فولطية سالبة.

في الطاقة الكهربائية الاعتيادية لتيار متردد ، تتفاوت فولطية الحيّ بشكل جيبي - تتناسب مع دالة الجيب المثلثية بالنسبة للزمن (شكل ٣,٢,١١). وهذه الفولطية المترددة بسلاسة تدفع تياراً متردداً بسلاسة خلال المصباح. وأثناء كل انعكاس، يتباطأ التيار في الفتيلة تدريجيا إلى أن يقف قبل أن يجمع قوة في الاتجاه المعاكس. ففي الولايات المتحدة الأمريكية، تنعكس فولطيات التيار المتردد كل جزء من 120 من الثانية، معطية 60 دورة كاملة من الانعكاس (ذهابا وإيابا) كل ثانية (60Hz). وفي أوروبا، يحدث الانعكاس كل جزء من 100 من الثانية، ففولطيات التيار المتردد تُكمل 50 دورة كاملة من الانعكاس كل ثانية (50Hz).

من حسن الحظ أن هذه الانعكاسات لها مجرد تأثير طفيف على العديد من الأجهزة المنزلية. تستهلك المصابيح والحمّاسات (شكل ٤,٢,١١) طاقة بسبب مقاوماتها الكهربائية ولا تكترث باتجاه التيار الذي يمر خلالها. وفي الحقيقة، يُستخدم استهلاك الطاقة في مثل هذه الأجهزة الأومية البسيطة لتحديد الفولطية الفعّالة للطاقة الكهربائية لتيار متردد. تُعرّف فولطية مقبس التيار المتردد المعطاة - اصطلاحا، جذر متوسط مربع فولطيته أو فولطية RMS -،بأنها تساوي فولطية التيار المستمر التي تُحدث نفس استهلاك الطاقة المتوسط في جهاز أومي. وبالتالي فإن 120V من كهرباء تيار متردد توصّل نفس متوسط الطاقة للحماسة مثل 120V من الكهرباء تيار مستمر.

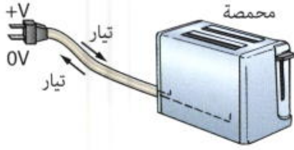
ولكن انعكاسات كهرباء التيار المتردد ليست دون تداعيات. أولا: بعض الأجهزة الكهربائية ومعظم الأجهزة الإلكترونية حسّاسة بالنسبة لاتجاه التيار المتدفق ويجب أن تتعامل مع الانعكاسات بعناية. ثانيا: الكهرباء المتوفرة من مقبس كهرباء تيار متردد اعتيادي ترتفع وتنخفض مع كل انعكاس للفولطية وتصبح صفرية لحظيا عند لحظة الانعكاس ذاته. ففي الحقيقة يومض مصباحك ثم يخبو طفيفا بسبب هذه التذبذبات في الكهرباء، والأجهزة التي لا يمكنها تحمّل لحظة واحدة دون كهرباء يجب أن تُخزّن طاقة لتتجنب الانطفاء

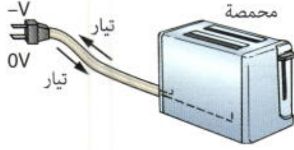


شكل ٣,٢,١١: تتفاوت فولطية سلك حيّ في مقبس أمريكي ذي 120V لتيار متردد بشكل جيبي مع الزمن وتُكمل 60 دورة كاملة كل ثانية. في حين تصل الفولطية للقمة عند ±170V ، إلا أن متوسطها الزمني الفعلي أو جذر متوسط مربعها RMS هو 120V. وفولطية السلك المحايد دائما صفر.

أثناء الانعكاسات.

أخيرا، تصل كهرباء التيار المتردد المتفاوتة جيبيا لقمة هي أعلى من قيمتها المعطاة، فتتجاوز تلك القيم بمعامل جذر 2 (حوالي 1.414). فعلى سبيل المثال، فولطية التوصيل الحيّ في مقبس كهرباء اعتيادي 120V في الواقع تتأرجح بين 170V+ و 170V-. تلك الفولطيات القممية المرتفعة مهمة في العزل والسلامة الكهربائية.





شكل ٤،٢،١١: التيار المار خلال حماسة الخبز هذه يعكس اتجاهه بشكل دوري عندما تنعكس فولطية الطرف الحي من الحماسة (أعلى). ويظل طرف الحماسة المحايد (أسفل) عند 0V.

تحقق من فهمك # ٢: التوقيت هو كل شيء

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إن غرز أصابعك في مقبس كهربائي ليس فكرة جيدة على الإطلاق، لكن هل هناك لحظة يمكنك أن تقوم بذلك دون أن تصاب بصدمة كهربائية؟

الحث المغنطيسي

كان أديسون شديد المعارضة للتيار المتردد، والذي رآه كشيء خطر وغريب. بالتأكيد، فولطياته المتذبذبة ولحظات انعدام الكهرباء فيه لا تجعل التيار المتردد يبدو جذابا.

بطل التيار المتردد كان نيكولا تيسلا (١٨٥٦-١٩٤٣م)، مخترع أمريكي-صربي، والذي كان مدعوما ماديا من قبل المخترع والصناعي الأمريكي جورج ويستنغهاوس (١٨٤٦-١٩١٤م). الميزة التي رآها تسلا وويستنغهاوس في التيار المتردد كانت أن طاقته يمكن نقلها - يمكن أن تمرر بواسطة فعل كهرومغنطيسي من دائرة كهربائية لأخرى بواسطة جهاز يسمى محوّلاً.

يستخدم المحوّل رابطين مهمين بين الكهرباء والمغنطيسية لنقل الكهرباء من دائرة تيار متردد إلى أخرى. الأول مألوف: الشحنة الكهربائية المتحركة تكوّن مجالات مغنطيسية. فهذا الرابط يسمح للكهرباء بإنتاج مغنطيسية. ولكن الرابط الثاني شيء جديد: المجالات المغنطيسية التي تتغير مع الزمن تكوّن مجالات كهربائية. وهذه العلاقة، والتي اكتشفها مايكل فاراداي في عام ١٨٣١م (انظر[٥])، تسمح للمغنطيسية بإنتاج الكهرباء!

[٥] بتعليم ابتدائي فقط، عمل الكيميائي والفيزيائي الانجليزي مايكل فاراداي (١٧٩١ - ١٨٦٧م) كمساعد لعامل تغليف كتب وعمره ١٤ سنة. عندما بلغ ٢١ عاماً، أصبح مساعداً معملياً للكيميائي المعروف همفري دافي. تجارب فاراداي في الكهرومغنطيسية وعلمه بأبحاث أورستيد وأمبير قادته للتفكير بأنه إذا أمكن للكهرباء أن تكوّن المغنطيسية، إذاً يجب أن تكون المغنطيسية قادرة على تكوين الكهرباء. من خلال التجارب الدقيقة، وجد فاراداي مثل هذا التأثير. بالقرب من نهاية مدة مهنته، أصبح فاراداي محاضرا مشهورا في العلوم وبذل مجهودا خاصاً في وصوله للأطفال.

الرابط الثاني بين الكهرباء والمغنطيسية

المجالات المغنطيسية التي تتغير مع الزمن تنتج مجالات كهربائية.

سواء أرجحت مغنطيسا دائما ذهابا وإيابا، أو فتحت وأغلقت مغنطيساً كهربائيا، فأنت تُغيّر مجالا مغنطيسيا مع الزمن وبالتالي تنتج مجالا كهربائيا. فإذا كانت هناك شحنات كهربائية متحركة تستجيب لذلك المجال الكهربائي، فإنها ستتسارع وستكون قد أنشأت أو غيرت تيارا كهربائيا ومن المحتمل أنك قمت ببذل شغل عليه أيضا. هذه العملية، والتي قام فيها مجال مغنطيسي متغيّر مع الزمن بإنشاء أو التأثير على تيار كهربائي، تسمى الحث المغنطيسي.

يجمع المحوّل بين هذين الارتباطين بالترتيب - الكهرباء تنتج مغنطيسية والتي تنتج كهرباء. ولكن بدلا من إعادة الطاقة الكهربائية إلى حيث بدأت، يُحرك المحوّل تلك الطاقة من التيار في ملف سلكي إلى التيار في ملف سلكي آخر خلال مجال مغنطيسي.

تحقق من فهمك # ٣: الفونوغرافات الكهربائية (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

في زمن الأسطوانات الفينيل، كان الفونوغراف يعيد إنتاج الصوت بانزلاق إبرة من الألماس خلال أخاديد الأسطوانة المتموجة. يتحرك مغنطيس متصل بتلك الإبرة للأعلى وللأسفل مع كل تموّج وينتج تيارا في سلك ملفي قريب. لماذا أثرت حركة المغنطيس على الملف؟

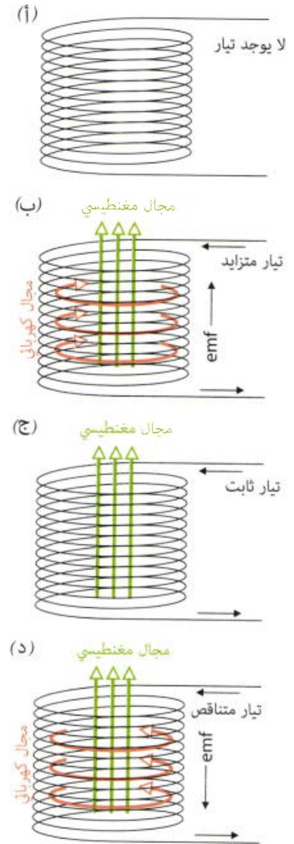
التيار المتردد وملف سلكي

لمساعدتنا في فهم انتقال الطاقة الذي يحدث في محوّل، لنبدأ بحالة أبسط. ماذا يحدث عندما ترسل تيارا مترددا خلال ملف سلكي واحد؟

بسبب أن التيارات مغنطيسية، يصبح الملف مغنطيساً كهربائيا. ولكن بما أن التيار المار خلاله يعكس اتجاهه بشكل دوري، كذلك يحدث للمجال المغنطيسي. ولأن المجال المغنطيسي الذي يتغيّر مع الزمن يُنتج مجالا كهربائيا، فإن المجال المغنطيسي المتردد في الملف يُنتج مجالا كهربائيا مترددا.

هذا المجال الكهربائي له تأثير مدهش: يدفع المجال الكهربائي على كل تيار متردد ينتجه! في حين ليس من الواضح كيف لهذا المجال الكهربائي أن يؤثر على ذلك التيار، إلا أن النتيجة واضحة (شكل ٥،٢،١١). حينما يتزايد تيار الملف، فإن المجال الكهربائي المستحث يدفع ذلك التيار للخلف وبالتالي يعارض زيادته (شكل ٥،٢،١١ ب). وحينما يتناقص تيار الملف، فإن المجال الكهربائي المستحث يدفع ذلك التيار إلى الأمام وبالتالي يعارض تناقصه (شكل ٥،٢،١١ د). ومن المدهش أنه كيفما تغيّر تيار الملف فإن المجال الكهربائي المستحث يعارض ذلك التغير دائماً!

هذه المعارضة للتغيّر هي عامة في الحث المغنطيسي، حيث تُعرف بـقانون لينز: تعارض تأثيرات الحث المغنطيسي التغيرات التي تنتجها. ففي الحالة الحالية، يقود الحث المغنطيسي الموجَّه ذاتيا أو «الحث الذاتي» ملفنا لمعارضة تغيرات تياره الذاتية. المعارضة الطبيعية في سلك الملف للتغير في التيار يجعله مفيداً جدا في الإلكترونيات، حيث يُسمى ملفاً حثّياً.



شكل ٥،٢،١١: (أ) بدون تيار، ليس لملف الحث هذا مجالات كهربائية ولا مغنطيسية. (ب) ينتج التيار المتزايد مجالا مغنطيسيا متزايدا في ملف الحث، والذي بدوره ينتج مجالا كهربائيا. وتعارض القوة الدافعة الكهربائية الناتجة من ذلك المجال الكهربائي الزيادة في التيار. (ج) ينتج التيار الثابت مجالا مغنطيسيا ثابتا فقط. (د) ينتج التيار المتناقص مجالا مغنطيسيا متناقصا في ملف الحث، والذي بدوره ينتج مجالا كهربائيا آخر. ولكن القوة الدافعة الكهربائية الناتجة تعارض الآن النقص في التيار.

قانون لينز

تُعارض تأثيرات الحث المغنطيسي التغيرات التي تُنتجها.

ولكن الحث المغنطيسي يقوم بأكثر من دفع التيارات هنا وهناك؛ بل يمكنه أيضا أن ينقل الطاقة. ويبذل مجاله الكهربائي المستحث شغلا على أي شحنة تتحرك مع دفعه وشغلا سالبا على أي شحنة تتحرك عكس دفعه. عندما يبذل الحث شغلا فعلياً على شحنة تمر خلال ملفنا، فإن تلك الشحنة تواجه ارتفاعاً في الفولطية. الارتفاع الفولطي الإجمالي، من بداية الملف إلى نهايته، تُسمّى قوة دافعة كهربائية مستحثة (اختصارا emf مستحثة). لكن بسبب تردد تيار الملف والمجال الكهربائي المستحث، فكذلك تتردد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة - فتتأرجح بين فولطيات موجبة وسالبة. ولأسباب متعلقة بذلك، تغادر الطاقة التيار وتعود إليه بشكل متردد. لكن أين تقع تلك الطاقة عندما لا تكون في التيار؟

الطاقة المفقودة تكون موجودة في المجال المغناطيسي للملف! تحتوي المجالات المغنطيسية على طاقة. مقدار الطاقة في مجال مغنطيسي منتظم هي نصف مربع شدة المجال مضروبا في حجم المجال مقسوما على نفاذية الفراغ. يمكننا كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية: (٢،٢،١١)

الطاقة = (المجال المغناطيسي^2 × الحجم) / (النفاذية في الفراغ × ٢)

ورمزيا:

$$U = \frac{B^2 . V}{2 \ . \mu_0}$$

وفي لغة الحياة اليومية: تُخزّن المغنطيسات الدائمة القوية الكثير من الطاقة المغنطيسية لدرجة أنها قد تتفجر إذا كسرتها.

معتقدات خاطئة شائعة: المغنطيسات كمصادر غير محدودة للطاقة

المعتقد الخاطئ:

المغنطيسات مصادر لانهائية للطاقة يمكن أن توفّر طاقة كهربائية أو مغنطيسية للأبد!

القرار:

في حين يحتوي مجال المغنطيس على طاقة، إلا أن تلك الطاقة محدودة وتم استثمارها فيه أثناء تمغنطه. لاستخلاص تلك الطاقة يجب أن تزيل مغنطة المغنطيس وبالتالي تتلفه.

إن ملفنا – فعلياً – يلعب بطاقة التيار التردد، فيخزنها لحظيا في المجال المغناطيسي ثم يُعيدها للتيار. يُخزّن الملف الطاقة حينما يتزايد مقدار التيار – فيقوى المجال ويفقد التيار فولطية. ويعيد الملف الطاقة حينما يتناقص مقدار التيار – فيضعف المجال ويكتسب التيار فولطية. بسبب أن قوة الملف الدافعة الكهربائية المستحثة ذاتيا هي المسؤولة عن إعادة تلك الطاقة إلى التيار، فكثيراً ما تسمى قوة دافعة كهربائية عكسية (اختصارا emf عكسية).

يسمح الحث الذاتي للملف وقوة الملف الدافعة الكهربائية العكسية له بأن يتعامل مع التيارات المترددة والفولطيات المترددة برشاقة مدهشة. يمكنك في الواقع أن تصل طرفي ملف مصمم بشكل جيد في مقبس كهربائي يوفر تيار متردد دون أي مشاكل على الإطلاق؛ سوف يخزن الملف الطاقة ويعيدها بتناغم. لكن هذه ليست عملية تود القيام بها بسلك اعتيادي!

على النقيض من سلك اعتيادي، والذي لا يمكنه بأمان استقبال تيار من المقبس بفولطية معينة ويعيده للمقبس بفولطية مختلفة، يمكن للملف أن يستخدم قوته الدافعة الكهربائية العكسية «لامتطاء» الفولطية المترددة للمقبس مثل امتطاء قنينة لموجات المحيط. بدفع التيار إلى الأمام أو إلى الخلف بواسطة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، يستطيع التيار أن يدخل إلى هذا الملف بفولطية معينة ويغادره بفولطية مختلفة تماما. في الحقيقة، لقوة الملف الدافعة الكهربائية العكسية فولطية صحيحة دائما بحيث التيار المار خلال الطرف الحي للملف بالفولطية الحية يمر خلال الطرف المحايد للملف بالفولطية المحايدة (0V). على سبيل المثال، عندما يكون الطرف الحي 170V+، فإن القوة الدافعة الكهربائية العكسية تكون 170V- : عندما يكون الطرف الحي 50V-، فإن القوة الدافعة الكهربائية العكسية 50V+؛ وعندما يكون الطرف الحي 0 V، فإن القوة الدافعة الكهربائية العكسية 0V.

تحقق من فهمك #٤: السقوط البطيء (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا أسقطت مغناطيساً قوياً على سطح لامغنطيسي لكنه موصل جيد، فإن المغنطيس سيهبط ببطء ملحوظ. ما الذي يعوق سقوط المغنطيس؟

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٦,٢,١١: يعمل هذا المصباح المكتبي الهالوجيني بفولطيات منخفضة يوفرها محوّل. يحمل قضيبا المصباح الداعمان أيضاً تيار متردد 12V من وإلى المصباح.

دقق في أرقامك # ١: مجال الطاقة

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٧)

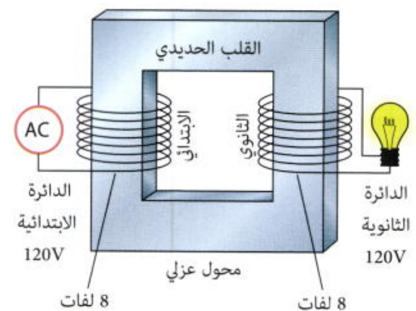
تملأ وحدة MRI التشخيصية حوالي $0.1m^3$ من الفراغ بمجال مغنطيسي مقداره 4.0T . ما مقدار الطاقة المحتواة في ذلك المجال؟

ملفان سوية: المحوّل

في ملف مفرد، يجب على الطاقة التي تنتقل من التيار إلى المجال المغناطيسي أن تعود إلى التيار في نهاية المطاف، فليس لها مكان آخر تعود إليه. لكن ماذا لو كان هناك ملفان وتياران؟ في تلك الحالة، يمكن للطاقة المنتقلة من تيار واحد إلى المجال المغناطيسي أن تنتقل أيضا إلى التيار الثاني!
هذه الإمكانية هي أساس المحوّل. وفي أبسط أشكاله، يحتوي المحوّل على ملفين منفصلين يتشاركان في نفس البيئة الكهرومغنطيسية. فيمكن لبعض أو جميع الطاقة المستثمرة في المجال المغنطيسي بواسطة التيار في الملف الأول أن تُستخلص من المجال المغنطيسي بواسطة التيار في الملف الثاني. وبالرغم من أن التيارين لا يتلامسان على الإطلاق ولا يتبادلان أي شحنة، إلا أن الطاقة يمكنها أن تتحرك من تيار إلى آخر بسهولة.
سوف نوضح هذا الانتقال للطاقة بفحص مصباح هالوجين مكتبي اعتيادي (شكل ٦,٢,١١). يتكون هذا الجهاز من محوّل ذي ملفين ومصباح هالوجيني. يوصل أحد ملفي المحوّل، ملفه «الابتدائي»، مباشرة بالمقبس الكهربائي ويُكمل الدائرة الكهربائية مع شركة الكهرباء (شكل ٧,٢,١١). تدفع شركة الكهرباء تياراً متردداً خلال هذه الدائرة الابتدائية. ويتصل الملف الآخر للمحوّل، ملفه «الثانوي»، بالمصباح الضوئي ويكمل دائرة كهربائية أخرى – الدائرة الثانوية. لضمان أن الملفين يتشاركان في نفس البيئة الكهرومغنطيسية، فإن كليهما يُلَف حول قلب حلقي الشكل قابل للتمغنط. سنناقش كيفية عمل ذلك القلب لاحقا في هذا القسم.

بذاته، يتصرف الملف الابتدائي كملف حثي، فيعمل بشكل تبادلي على تخزين الطاقة في مجاله المغنطيسي ثم إعادة تلك الطاقة للتيار الابتدائي بواسطة القوة الدافعة الكهربائية العكسية. بما أن هذه القوة الدافعة الكهربائية العكسية تعكس الفولطية الواصلة، والتي سنفترض أنها تيار متردد 120V ، فإن القوة الدافعة الكهربائية العكسية هي أيضا تيار متردد120V .

لكن بسبب أن الملف الثانوي يشترك في البيئة الكهرومغنطيسية للملف الابتدائي، فإن الملف الثانوي يواجه أيضا قوة دافعة كهربائية مستحثة ويظهر فرق في الفولطية بين طرفيه. بما أن الملف الثانوي يُكوّن دائرة مع فتيلة المصباح، فإن هذا الفرق في الفولطية يفرض هبوطاً فولطياً على الفتيلة ويدفع تياراً خلالها. ويتردد ذلك التيار لأن القوة الدافعة الكهربائية تتردد. باختصار، تتحرك الطاقة من خلال فعل كهرومغنطيسي من تيار



شكل ٧,٢,١١: ينقل هذا المحوّل طاقة من التيار في دائرته الابتدائية إلى التيار في دائرته الثانوية. يوجه القلب الحديدي الفيض المغنطيسي بحيث يتشارك الملفان في نفس البيئة الكهرومغنطيسية. وبلفات متساوية في الملفين الابتدائي والثانوي، فإن هذا المحوّل يوفر نفس فولطية تيار متردد من ملفه الثانوي كالذي يستقبلها من ملفه الابتدائي.

متردد في الدائرة الابتدائية إلى تيار متردد في الدائرة الثانوية فتضيء المصباح.
إذا كان المحول يوفّر طاقة للتيار في دائرته الثانوية، فلا بد أنه يزيل نفس مقدار الطاقة من التيار في دائرته الابتدائية. بالتأكيد، يستخدم المحوّل الحث المغنطيسي للقيام بذلك. ولكن الحث هذه المرة معكوس: يحث التيار في الدائرة الثانوية قوة دافعة كهربائية في الملف الابتدائي وتلك القوة الدافعة الكهربائية تزيل الطاقة من التيار الابتدائي!

تحدث هذه الإزالة بطريقة مثيرة. تزيد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف الابتدائي من التيار الابتدائي كلما استثمرت طاقة في المجال المغناطيسي للمحوّل وتُنقص ذلك التيار كلما سحبت طاقة من المجال. في حال كون الاستثمار أكثر من السحب، فإن التيار الابتدائي يخلف طاقة في المجال المغنطيسي ويحمل التيار الثانوي هذه الطاقة بعيدا!

من المدهش أن عملية نقل الطاقة تستجيب تلقائيا لأي تغيرات في استهلاك الطاقة في الدائرة الثانوية. فعلى سبيل المثال، إذا استبدلت المصباح المكتبي بآخر يستهلك طاقة أكبر، فإن تيارا أكبر سيتدفق خلال الملف الثانوي بحيث ينقل الحث طاقة أكبر من التيار الابتدائي إلى التيار الثانوي. وإذا أزلت المصباح تماما، فإن التيار الثانوي سيختفي وسيتوازن الاستثمار والسحب في طاقة التيار الابتدائي تماما.

تحقق من فهمك #٥: استخدمه فقط مع كهرباء تيار متردد (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا أرسلت تيارا مستمرا خلال الملف الابتدائي لمحوّل، فلن تنتقل أي طاقة للدائرة الثانوية. فسّر ذلك.

الفولطيات المتغيرة

قد تبدو المحوّلات مثيرة، لكن لماذا يحتاج المصباح المكتبي لمحوّل؟ لماذا لا نصل المصباح مباشرة بالمقبس لتكوين دائرة منفردة مع شركة الكهرباء؟
في المصباح المكتبي، وظيفة المحوّل أن يوفّر للمصباح كهرباء تيار متردد ذات فولطية منخفضة. ومثل المصباح في الكشّاف الضوئي، فإن المصباح المكتبي مصمم للعمل بفولطيات صغيرة. يستمد هذا المصباح ذو الفولطية المنخفضة طاقته الحرارية من تيار كبير يواجه هبوطاً فولطياً صغيراً، لذا فإن فتيلته لها مقاومة كهربائية صغيرة وتكون سميكة وقصيرة وقوية. على النقيض من ذلك، يستمد المصباح ذو الفولطية العالية طاقته الحرارية من تيار صغير يواجه هبوطاً فولطياً كبيراً، لذا فإن فتيلته تحتاج مقاومة كهربائية كبيرة ويجب أن تكون رفيعة وطويلة ورقيقة. كما أن الفتيلة الأقصر ذات الفولطية المنخفضة هي أيضا مصدر ضوئي أكثر تركيزا، والذي يجعلها مثالية للمصباح المكتبي. لتوفير كهرباء تيار متردد ذات فولطية منخفضة، يتم لف الملف الثانوي في المحوّل بشكل مختلف عن ملفه الابتدائي.

في أي محوّل، يواجه الملف الثانوي قوة دافعة كهربائية مستحثة تعتمد على عدد لفاته – أي عدد المرات التي يلتف فيها سلكه حول القلب. كلما زاد عدد اللفات التي يقوم بها التيار الثانوي حول القلب، زاد الشغل الذي يبذله المجال الكهربائي للمحوّل على ذلك التيار وزادت القوة الدافعة الكهربائية. وبما أن مقدار الشغل المبذول يتناسب مع عدد اللفات، كذلك الحال في القوة الدافعة الكهربائية المستحثة للملف الثانوي.

لكن ما هي القوة الدافعة الكهربائية المستحثة الحقيقية في محوّل معيّن؟ افترض أن لدينا محوّلاً بسيطاً يكون فيه الملفان، الابتدائي والثانوي، متماثلين – أي لهما نفس عدد اللفات – وأن الملف الابتدائي لذلك المحوّل متصل بمقبس تيار متردد 120V.
بما أن الملف الابتدائي للمحول يعمل كملف حثي، فإن قوته الدافعة الكهربائية العكسية تعكس فولطية التيار المرتدد الموضوعة عليه وبالتالي هي تيار متردد 120V. لكن بسبب أن الملفين متماثلان ويتشاركان في نفس البيئة الكهرومغنطيسية، فإن تلك القوة الدافعة الكهربائية الحثية ذاتها تظهر في الملف الثانوي: تيار متردد 120V. إذا وصلنا الملف الثانوي بمصباح مناسب لتكوين دائرة كاملة، فإن الملف الثانوي سيعمل كمصدر طاقة كهربائية لتيار متردد 120V ويضيء المصباح.

يُعرف هذا الجهاز البسيط بالمحوّل العزلي. عندما تصل ملفه الابتدائي بمقبس تيار متردد، فإن ملفه الثانوي يعمل كمصدر كهرباء لتيار متردد عند فولطية المقبس. بالرغم من أن الملف الثانوي يحاكي مقبس الكهرباء ، إلا أن المحوّل العزلي يوفّر مقياساً مهماً للأمان الكهربائي. فبما أن دائرتيه الابتدائية والثانوية معزولة كهربائيا، فإن الشحنة لا يمكنها الانتقال بين تلك الدائرتين وإحداث الضرر. فعلى سبيل المثال، عندما يضرب البرق أسلاك شركة الكهرباء، فإن اندفاع الشحنات الناتج في الدائرة الابتدائية لا يمكنه أن ينتقل لأي جهاز يُعد جزءاً من الدائرة الثانوية. وليس مدهشا أن المستشفيات كثيراً ما تستخدم محوّلات عزلية لحماية المرضى من الصدمات الكهربائية.

لكن معظم المحوّلات لها ملفات غير متكافئة وبالتالي قوات دافعة كهربائية مختلفة في ملفاتها. وبما أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية في الملف الثانوي تتناسب مع عدد لفاته، فإنها تعمل كمصدر كهرباء تيار متردد بفولطية تساوي الفولطية المطبقة في ملفها الابتدائي مضروبة في النسبة بين عدد اللفات الثانوية إلى عدد اللفات الابتدائية أو (٣،٢،١١)

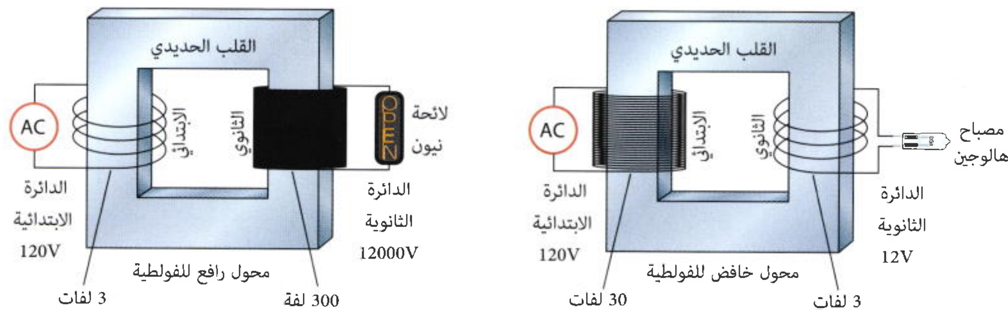
$$\text{الفولطية الثانوية} = \text{الفولطية الابتدائية} \cdot \frac{\text{اللفات الثانوية}}{\text{اللفات الابتدائية}}$$

المحوّل العزلي هو ببساطة حالة خاصة حيث عدد اللفات متساوٍ ونسبتهما ١.

يُسمّى المحوّل في مصباحنا المكتبي محوّلاً خافضاً للفولطية لأن له عدد لفات ثانوية أقل من عدد اللفات الابتدائية ويوفر فولطية ثانوية أقل من الفولطية الابتدائية (شكل ٨،٢،١١). إذا افترضنا أن النسبة بين عدد اللفات الثانوية إلى عدد اللفات الابتدائية هي فقط 0.1، فإن الملف الثانوي سيعمل كمصدر لكهرباء تيار متردد ذات 12V.

ليس من المدهش أن هناك أيضا محولات رافعة للفولطية والتي لها عدد لفات ثانوية أكثر من عدد اللفات الابتدائية وتوفّر فولطيات ثانوية أكبر من فولطياتها الابتدائية (شكل ٩،٢،١١). المحوّل الذي يشغّل لوحة إعلان نيون له في المعتاد 100 ضعف عدد اللفات في ملفه الثانوي بالنسبة لملفه الابتدائي. عندما يتم توفير كهرباء تيار متردد ذات 120V لملفه الابتدائي، فإن ملفه الثانوي يوفّر كهرباء تيار متردد ذات 12,000V اللازمة لإضاءة أنبوب النيون.

حتى وإن كانت فولطيات المحوّل الابتدائية والثانوية مختلفة، فإن المحوّل يظل قادرا على حفظ الطاقة. في حين تزيد كل لفة إضافية في الملف الثانوي من فولطيته، فإنها أيضا تزيد من معدل سحب التيار الثانوي للطاقة من المجال المغنطيسي للمحوّل. إذا زدت عدد لفات الملف الثانوي لزيادة الفولطية، فيجب أن تُخفّض التيار المتدفق خلال ذلك الملف لكي تبقي



شكل ٨،٢،١١: مع كون عدد اللفات في ملفه الابتدائي 10 أضعاف اللفات في ملفه الثانوي، فإن هذا المحوّل الخافض للفولطية يحوّل الكهرباء التيار المتردد 120V إلى كهرباء التيار المتردد 12V.

شكل ٩،٢،١١: مع كون عدد اللفات في ملفه الثانوي 100 ضعف اللفات في ملفه الابتدائي، فإن هذا المحوّل الرافع للجهد يحوّل كهرباء التيار المتردد 120V إلى كهرباء تيار متردد 12,000V.

مقدار الطاقة المسحوبة من المجال المغنطيسي ثابتاً. نتيجة لذلك، التيار الثانوي يساوي التيار الابتدائي مضروبا في نسبة عدد اللفات الابتدائية إلى عدد اللفات الثانوية أو (٤،٢،١١)

$$\text{التيار الثانوي} = \text{التيار الابتدائي} \times \frac{\text{اللفات الابتدائية}}{\text{اللفات الثانوية}}$$

في المحوّل الخافض للفولطية في مصباح مكتبنا، للمف الابتدائي عشرة أضعاف لفات الملف الثانوي. ووفقا للمعادلة (٣،٢،١١)، فإن الفولطية الثانوية هي 0.1 مرة من الفولطية الابتدائية، ووفقا للمعادلة (٤،٢،١١)، التيار الثانوي هو عشرة أضعاف التيار الابتدائي. فإذا صُمم المصباح ذو 12V الذي تضعه في المصباح المكتبي لكي يستهلك 24W من القدرة، فإن تيارا مقداره 2A سيتدفق خلال الدائرة الثانوية. ولتوفير هذه القدرة، فإن الملف الابتدائي للمحوّل سيحمل 0.2A من التيار يوفرها تيار متردد 120V. إجمالا، تتدفق 24W من القدرة من الدائرة الابتدائية للمحوّل إلى دائرته الثانوية.

تحقق من فهمك # ٦: مشكلة السير (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

يعمل مصباحك المتنقل على كهرباء تيار متردد 120V ، لكنك تزور دولة لها كهرباء تيار متردد 240V. تقوم بوصل محول التجوال في مقبس تيار متردد 240V فيوفر محوله كهرباء تيار متردد 120V لمصباحك والتي يحتاجها. قارن بين عدد اللفات في ملفي المحوّل.

المحوّلات الحقيقية: ليست مثالية تماما

بالرغم من أننا قد زعمنا أن الملفات الحثية والمحولات هي بلا عيوب وأن أسلاكها توصل الكهرباء بشكل مثالي، إلا أن هذا غير صحيح. ففي الواقع، الأسلاك المستخدمة في هذه الأجهزة لها مقاومات كهربائية وتهدر القدرة بالتناسب مع مربع التيارات التي تحملها. ولتقليص هذه القدرة المهدرة، تُصمم الملفات الحثية والمحوّلات الحقيقية بحيث تقلل من مقاوماتها. فتستخدم هذه الأجهزة أسلاكاً سميكة مصنوعة من معادن جيدة التوصيل وتُبقى تلك الأسلاك أقصر ما يمكن في حدود الاستخدام العملي.

من المؤسف أن الملفات الحثية والمحوّلات المبنية فقط من أسلاك لا يمكنها أن تنتج المجالات المغنطيسية القوية التي تحتاجها لتخزين كميات كبيرة من الطاقة إلا إذا استخدمت ملفات طويلة متعددة اللفات. ولتجنب الملفات الطويلة، فإن العديد من الملفات الحثية، وتقريباً جميع المحوّلات، تلف ملفاتها حول قوالب قابلة للتمغنط. تستجيب مثل هذه القوالب مغنطيسيا للتيارات المترددة المحيطة بها، فتقويّ المجالات المغنطيسية الناتجة وتجعل من السهل تخزين كميات كبيرة من الطاقة. وبدعم هذه المواد القابلة للتمغنط – من المعتاد الحديد أو سبائك الحديد – فإن الملفات الحثية والمحوّلات ذات القوالب تعمل بشكل جيد حتى بملفات قصيرة ذات لفات قليلة.

يوفّر القلب فائدة أخرى مهمة للمحوّل: يوجه خطوط الفيض المغناطيسي للمحوّل بحيث يمر جميعها تقريباً خلال الملفين، حتى وإن كان الملفان مفصولين عن بعضهما نوعاً ما في الفراغ. إن تشاركهما في خطوط الفيض بهذه الطريقة يُعطي الملفين بيئة كهرومغنطيسية مشتركة ويسمح لهما بتبادل القدرة الكهربائية بسهولة.

إن جعل ملفين منفصلين يتشاركان في خطوط فيضهما ليس بالأمر السهل. وبما أن الملف ليس له محصلة قطب مغنطيسي، فإن كل خط فيض يخرج منه يجب أن يعود إليه في نهاية المطاف. لكن بدون قلب، معظم خطوط الفيض المغادرة للملف تعود له بشكل مباشر تقريباً وتظل بالقرب من الملف خلال رحلتها. ومن غير المحتمل لخطوط الفيض هذه التي تفتقر لروح المغامرة أن تمر خلال ملف ثانٍ منفصل. وليس من المفاجئ أن المحوّل الذي ليس له قلب يعمل بشكل جيد فقط عندما تُلف ملفاه بالقرب من بعضهما بحيث لا يستطيعان إلا أن يتشاركا في نفس خطوط الفيض.

إن لف كلا الملفين حول قلب مغنطيسي حلَقي الشكل يجعل من السهل لخطوط الفيض أن تمر خلال الملفين لأن تلك الخطوط تُسحب إلى داخل مادة القلب المغنطيسية الرخوة وتتبعه كما لو أنها في أنبوب. فبالرغم من أن خطوط الفيض المغادرة للملف مازال عليها أن تعود إليه في نهاية المطاف، فإن معظمها يُكمل هذه الرحلة عن طريق القلب - رحلة تأخذهم بعدها خلال الملف الآخر. وبتوجيه جميع خطوط الفيض تقريبا خلال الملفين بواسطة القلب، فإن القدرة يمكنها أن تتدفق بسهولة من ملف لآخر.

وهكذا يوفّر القلب مرونة فائقة للمحوّل: يمكن أن تكون ملفاته في أي مكان طالما أنها تلتف حول ذلك القلب. ولكن القوالب ليست أنابيب مثالية للفيض؛ حيث يتسرب قليل من الفيض. لذا، فإن المحوّلات الأكثر كفاءة لها ملفات ملتفة قريبا من بعضها أو فوق بعضها البعض.

لكن في حين القوالب القابلة للتمغنط تجعل المحولات الصغيرة ذات الكفاءة العالية عملية، إلا أنها تُحدث بعض المشاكل أيضا. أولا: يجب على القوالب أن تتمغنط وتزيل مغنطتها بسهولة لكي تجاري عمليات استثمار الطاقة وسحبها. وإذا تخلفت عن هذه المجاراة، فإنها ستهدر طاقة على شكل طاقة حرارية. من المؤسف أن السلاسة المغنطيسية المثالية لا يمكن الحصول عليها، وكل القوالب تُهدر طاقة قليلة على الأقل من خلال تأخرها في تمغنطها.

ثانيا: بسبب أن هذه القوالب معرّضة لنفس المجالات الكهربائية التي تدفع التيارات في الملفات، فإن عليها أن لا توصل الكهرباء. وإذا وصلت الكهرباء، فإنها ستنتج تيارات داخلية عديمة الفائدة تُعرف بتيارات دوامية وبالتالي تُهدر طاقة بتسخين ذاتها. بما أن معظم المواد المغنطيسية الرخوة هي موصلات كهربائية، فإن قوالب المحوّلات كثيراً ما تُقسم إلى جسيمات أو ألواح معزولة بحيث لا يمكن أن يتدفق تيار، أو فقط قليل منه، خلالها. لكن بالرغم من الجهود الكثيرة المبذولة لتقليل التسخين بسبب المقاومة في الملفات، وتقليل الفقد بسبب التمغنط والتيارات الدوامية، إلا أن جميع المحوّلات ما زالت تهدر بعضاً من الطاقة. حتى أفضل المحوّلات لها فقط ٪99 كفاءة في الطاقة.

تحقق من فهمك # ٧: رياح التغيير (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

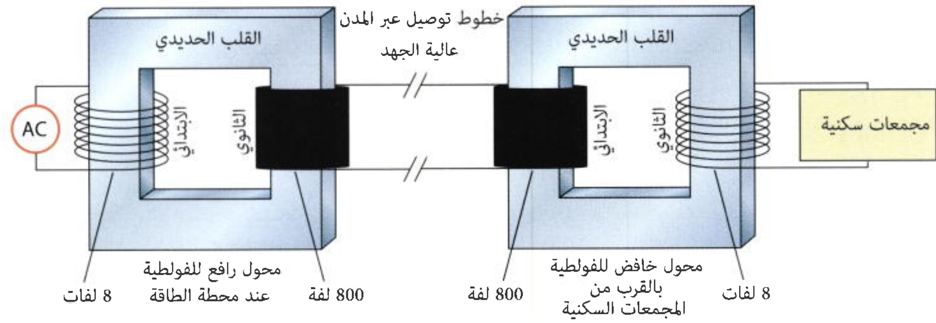
محوّلات القدرة الكبيرة لها فتحات تبريد وغالبا مراوح لنفخ الهواء خلالها. لماذا يحتاج المحوّل لهذا التبريد؟

توزيع طاقة التيار المتردد

أخيراً، نحن الآن مستعدون للتعامل مع الخلافات الأساسية في نقل الكهرباء. لتقليل التسخين الناتج من المقاومة في خطوط الكهرباء التي تصل بين محطة الكهرباء ومدينة بعيدة، فإن الطاقة الكهربائية يجب أن تسير خلال تلك الخطوط كتيارات صغيرة بفولطيات عالية جداً. لكن عمليا، وكذلك لتجنب الصدمات الكهربائية وأخطار الحرائق، فإن الطاقة الكهربائية يجب أن تصل للمنازل كتيارات عالية بفولطيات متواضعة.

في حين لا توجد طريقة بسيطة لتحقيق كلا المتطلبين بشكل آني باستخدام التيار المستمر، فإن المحوّلات تجعل من السهل تحقيقهما باستخدام التيار المتردد. يمكننا استخدام محوّل رافع للفولطية لإنتاج التيار ذي الفولطية العالية والمناسب للنقل عبر المدن ومحوّل خافض للفولطية لإنتاج التيار ذي الفولطية المنخفضة المناسب لتوصيله للمجمعات السكنية (شكل ١٠،٢،١١).

عند محطة توليد الكهرباء، يدفع المولّد تياراً متردداً ضخماً خلال الدائرة الابتدائية لمحوّل رافع للفولطية بفولطية مقدارها 5000V تقريبا. التيار المتدفق خلال الدائرة الثانوية هو حوالي 100/1 جزء من قيمته في الدائرة الابتدائية، لكن الفولطية التي يوفرها الملف الثانوي أعلى بكثير، في المعتاد حوالي 500,000V.

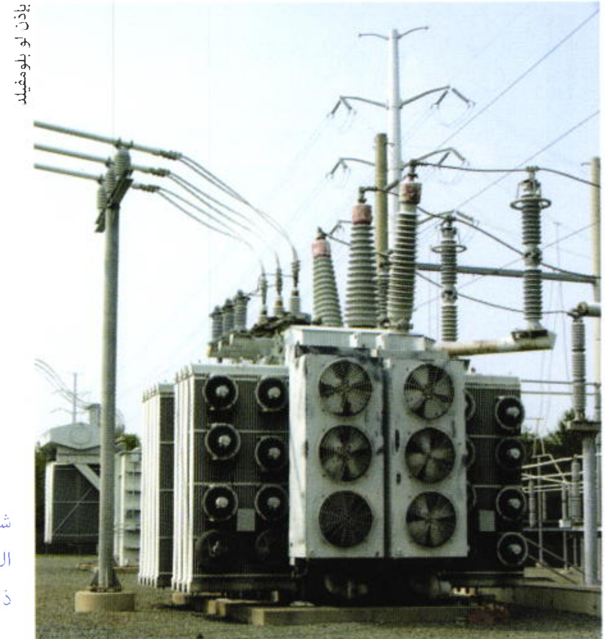


شكل ١٠،٢،١١: تُنقل الكهرباء عبر المدن برفع فولطيتها لفولطيات عالية جداً بالقرب من محطة توليد الكهرباء، ونقلها كتيار صغير بفولطية مرتفعة جداً، ثم إعادة خفض فولطيتها لفولطية منخفضة بالقرب من المجمعات السكنية التي توفر لها الخدمة. الدائرة الثانوية لمحوّل رفع الفولطية هي أيضا الدائرة الابتدائية لمحوّل خفض الفولطية.

الدائرة الثانوية لهذا المحوّل طويلة جدا، وتمتد إلى المدينة التي ستُستخدم فيها الكهرباء. وبما أن التيار في هذه الدائرة صغير، فإن الطاقة المهدرة في تسخين الأسلاك تظل في حدود المقبول.

عندما تصل الكهرباء إلى المدينة، يمر هذا التيار ذو الفولطية العالية جداً خلال الملف الابتدائي لمحوّل خافض للفولطية (شكل ١١،٢،١١). الفولطية التي يوفرها الملف الثانوي في هذا المحوّل هي حوالي 1/100 جزء من الفولطية الموفَّرة لملفه الابتدائي، لكن التيار المتدفق خلال الدائرة الثانوية هو حوالي100 ضعف قيمة التيار في دائرته الابتدائية.

الآن أصبحت الفولطية مناسبة للاستخدام في المدينة. وقبل دخول المنازل، يتم خفض هذه الفولطية أكثر بواسطة محوّلات أخرى. يمكن رؤية المحوّلات الخافضة للفولطية النهائية والتي تبدو كأسطوانات معدنية معلقة على الأعمدة (شكل ١٢،٢،١١) أو كصناديق معدنية خضراء على الأرض (شكل ١٣،٢،١١). يدخل التيار إلى المباني بفولطية ما بين 110V و240V، اعتمادا على المقاييس المحلية. وفي حين تهدر الكهرباء ذات 240V طاقة أقل في الأسلاك المنزلية، إلا أنها أخطر من الكهرباء ذات 110V. تبنت الولايات المتحدة الأمريكية مقياس كهرباء 120V بينما تبنت أوربا مقياس كهرباء 230V.



بإذن لو بلومفيلد

شكل ١١،٢،١١: ينقل هذا المحوّل العملاق ملايين من الواط من القدرة الكهربائية من الدوائر الواقعة فوقه ذات الفولطيات العالية جدا التي تعبر المدن إلى الدوائر المجاورة على يساره ذات الفولطيات المتوسطة التي تعبر الأحياء. وتوفّر المراوح حماية للمحوّل من التسخين الزائد.

تحقق من فهمك # ٨: أسلاك ذات فولطية عالية

(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

إذا استطاع مرفق كهربائي أن يزيد فولطية خط نقله من 500,000V إلى 1,000,000V، كيف سيؤثر ذلك على الطاقة المهدرة كحرارة في الأسلاك؟

بإذن لو بلومفيلد

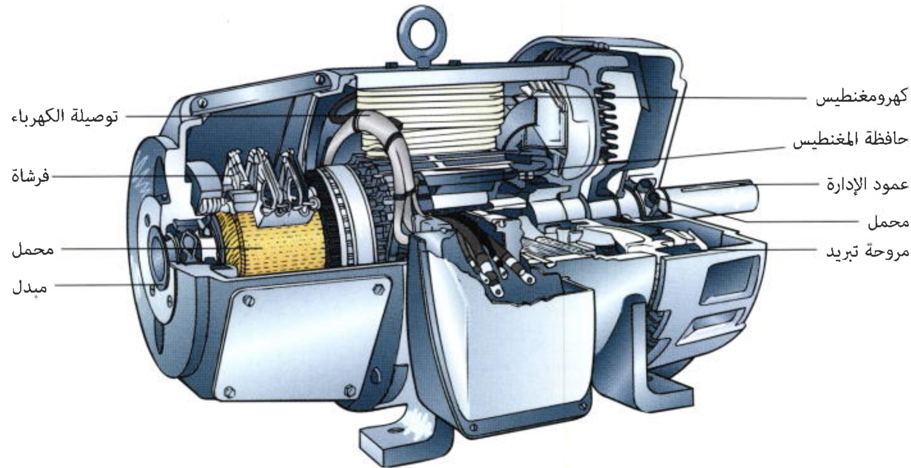


شكل ١٢,٢,١١: الأسطوانات الثلاثة المعدنية على هـذا العمود هي محوّلات. تنقل هذه المحوّلات الكهرباء مـن الدوائر الكهربائية فوقها ذات الفولطيات المتوسطة التي تعبر الأحيـاء إلى الدوائر الكهربائية المنزلية ذات الفولطية المنخفضة في أسفل اليمين.

بإذن لو بلومفيلد



شـكل ١٣,٢,١١: ينقل هـذا المحـوّل الكهرباء من دوائر تحت الأرض ذات فولطية متوسطة إلى دوائر تحـت الأرض ذات فولطيـة منخفضة مسـتخدَمة من قِبل المنـازل القريبة. يتحمّل هذا المحول قدرة كهربائية مقدارها 50kV·A أو 50,000W.



١١-٣ المولّدات والمحركات الكهربائية

لقد عرفنا ما هي الكهرباء وكيف تتوزّع. الآن سننظر في كيفية توليدها - كيف يمكن استخدام الحركة الميكانيكية لإنتاج القدرة الكهربائية. سنفحص أيضا كيف يمكن استخدام القدرة الكهربائية لإنتاج حركة ميكانيكية وذلك بدراسة المحركات الكهربائية. في الحقيقة، التناظر بين هاتين الملاحظتين ينذر بنتائج مذهلة: في الغالب، المولّدات والمحركات هي نفس الأجهزة!

بالرغم من أن المولّدات ضرورية لمحطات توليد الكهرباء، إلا أنها غير مألوفة في منزلك. تراها معظم الأوقات في السيارات وأجهزة طوارئ الكهرباء. ولكن المحركات الكهربائية موجودة في كل مكان، فتدير أجزاء غير محدودة من الآلات المنزلية. في بعض الأحيان تكون هذه الحركة الدورانية ظاهرة، كما هو الحال في المروحة والخلاّط، لكن في الغالب تكون مخفية، مثل الاضطراب في غسّالة الملابس أو اهتزاز الهاتف الخلوي. تأتي المحركات بأشكال وأحجام مختلفة، كل مناسب لمهمته. وبغض النظر عن مقدار العزم أو القدرة التي يجب أن يوفرها المحرك، بإمكانك أن تجد واحداً مناسباً. تعمل بعض المحركات بتيار مستمر ويمكن استخدامها ببطاريات، بينما تتطلب محركات أخرى تياراً متردداً. وهناك محركات تعمل على أيٍ من نوعي التيارات.

أسئلة للتفكير

كيف يمكن لجسم متحرك أن يدفع الشحنات الكهربائية خلال سلك وينتج كهرباء؟ كيف تحدد شركة الكهرباء مقدار الكهرباء التي يجب أن تولدها؟ إذا أغلق الجميع أضواءهم، هل سيلزم شركة الكهرباء أن تولّد نفس مقدار الكهرباء؟ كيف يمكن للقوى المغنطيسية أن تتسبب في دوران شيء ما؟ لماذا لا يمكن بناء محرك من المغنطيسات الدائمة فحسب؟ ما الذي يحدد اتجاه دوران المحرك؟ لماذا تكون بعض المحركات آمنة بالقرب من مواد كيميائية قابلة للاشتعال بينما محركات أخرى غير ذلك؟

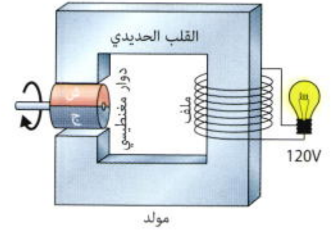
تجارب يمكن القيام بها

ألق نظرة في عدة محركات كهربائية مختلفة. ستجدها في المسجلات الصوتية، والمراوح، وخلاّطات الطبخ، ومشغلات السيارات. إن محرك المسجل الصوتي ومشغل السيارة كلاهما يعمل بكهرباء تيار مستمر، لكن أحدهما يستهلك قدرة كهربائية أكثر بكثير من الآخر ويوفر قدرة ميكانيكية أكثر بكثير من الآخر. ما هي الجوانب في محرك التشغيل في السيارة التي تسمح له بتحمّل قدرة عالية؟

تعمل محركات مراوح النافذة والخلاطات على كهرباء تيار متردد، لكن تركيبها الداخلي مختلف تماما. يبدأ محرك المروحة ببطء وتزداد سرعته تدريجياً بينما يصل محرك الخلاط لأقصى سرعته خلال لحظات فقط بعد تشغيله. كيف تُقارن العزوم الابتدائية التي يوفرها المحركان؟ ما الذي تعتقد أنه يحدد مقدار سرعة دوران هذين المحركين؟

المولّدات الكهربائية ذات التيار المتردد: تحول القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية

يحوّل المولّد القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية. يُنتج مغنطيسه الذي يدور حول نفسه مجالا مغنطيسيا مترددا داخل ملف من الأسلاك وبالتالي يحث قوة دافعة كهربائية داخله. إذا وصلت مصباحاً بملف المولّد وأكملت الدائرة الكهربائية، فإن ذلك الملف سيعمل كمصدر تيار متردد للقدرة الكهربائية وسيُضيء المصباح. إذا بدا هذا الترتيب مألوفا، فذلك لأنه تقريبا نفس تركيب المحوّل. في الواقع، الاختلاف الوحيد المهم بين المحوّل والمولّد هو الشيء الذي ينتج المجال المغنطيسي المتردد!



شكل ١,٣,١١: يشبه هذا المولّد المحول الموضح في الشكل (٧,٢,١١)، باستثناء أن الكهرباء تصل له خلال حركة دوّاره المغنطيسي الذي يدور حول نفسه، بدلا من خلال تيار كهربائي في ملف ابتدائي.

يوضح الشكل (١,٣,١١) مولّدا بسيطا، والذي يشبه بشكل مدهش المحوّل الموضح في الشكل (٧,٢,١١). كلا الجهازين له ملف (ثانوي) ملفوف حول قلب قابل للتمغنط. لكن في مكان الملف الابتدائي في المحوّل، يكون للمولّد مغناطيس يدور حول نفسه أو دوّار. حينما يدور ذلك الدوّار المغنطيسي، فإنه ينتج مجالا مغنطيسيا مترددا بشكل جيبي في الملف. وهذا المجال المغنطيسي المتردد بدوره ينتج مجالا كهربائيا مترددا ويحث قوة دافعة كهربائية مترددة في الملف. تُضيء تلك القوة الدافعة الكهربائية المصباح.

توضح هذه الخلاصة القصيرة كيفية توفير المولّد للقدرة الكهربائية لتيار متردد. لكن كيف تُحفظ الطاقة أثناء العملية وما الذي يُحدد تردد وفولطية تيار المولّد المتردد؟ بما أن المولّد لا يستطيع أن يُنشئ طاقة، فإن أي قدرة كهربائية يعطيها المولّد للتيار في ملفه يجب أن تنشأ كقدرة ميكانيكية في دواره. لنبدأ بدراسة كيف تستخلص عملية توليد القدرة الكهربائية القدرة الميكانيكية من الدوّار.

للإيضاح والتبسيط، سوف نهمل القوى الناتجة من ذات القلب القابل للمغنطة. الجانب الوحيد للقلب الذي لن نتغافل عنه هو توجيهه لخطوط الفيض المغناطيسي. يُشكّل القلب جسرا مغنطيسيا بين الدوّار والملف، فينقل المجال المغنطيسي للدوّار إلى الملف حتى وإن كانا منفصلين عن بعضهما في الفراغ. وحينما يدور الدوّار حول نفسه، فإن مجاله المغنطيسي يندفع خلال الملف كما لو أن الجسمين متلامسان تقريباً. فبفضل مساعدة القلب، يتشارك الدوّار والملف في نفس البيئة الكهرومغنطيسية.

بفصل المصباح، لن تكون هناك أي دائرة ولن يتدفق أي تيار خلال ملف المولّد. وبما أن المولّد لا ينتج أي قدرة كهربائية، فإنه من المفترض أنه لن يستخلص قدرة ميكانيكية من الدوّار. بالتأكيد، يدور الدوّار بحرية؛ فالملف الخالي من التيار هو لامغنطيسي ويندفع المجال المغنطيسي للدوّار خلاله بدون أي جهد!

لكن بوصل المصباح بالمولّد، تتكوّن دائرة ويمكن للتيار أن يتدفق. والآن حينما يندفع المجال المغنطيسي للدوّار خلال الملف، فإنه يحث تياراً متردداً في الملف ويُضيء المصباح. إن توليد هذه القدرة الكهربائية له تداعيات خطيرة على الدوّار؛ بسبب أن الملف الحامل للتيار أصبح مغنطيسيا، فإن الملف يتفاعل مع الدوّار ويستخلص قدرة ميكانيكية منه!

يبدأ ذلك التفاعل بين الدوّار والملف في اللحظة التي يبدأ فيها المجال المغنطيسي للدوّار بالاندفاع في الملف. يحث المجال المغنطيسي الواصل تيارا في الملف، والذي يجعله مغنطيسيا بمجال موجّه عكس مجال الدوّار. وتمشيا مع قانون لينز، فإن المغنطيسية المستحثة في الملف تُعارض المجال المغنطيسي الداخل للدوّار - وهو التغيّر الذي أحدثه. في الواقع، يصبح الملف مغنطيساً كهربائياً له أقطاب مقلوبة لتتنافر مع أقطاب الدوّار المقتربة منه. لذا، على الدوّار أن يقوم بشغل ميكانيكي ليجعل أقطابه مصطفة مع الملف.

يستمر الدوّار بالدوران ويبدأ بدفع مجاله المغنطيسي خارج الملف. هذا الانسحاب يحث مرة أخرى تيارا في الملف، لكن هذه المرة في الاتجاه المعاكس. يصبح الملف مغنطيسياً بمجال موجه على طول مجال الدوّار. مرة أخرى تُعارض المغنطيسية المستحثة للملف التغيّر الذي أحدثها – مجال الدوار المغنطيسي المغادر. في الواقع، يصبح الملف مغنطيساً كهربائياً بأقطابه المتعاكسة موجهة لتتجاذب مع أقطاب الدوّار المغادرة. يجب على الدوّار الآن أن يقوم بشغل ميكانيكي ليدير نفسه بعيدا عن الاصطفاف مع الملف.

لا يمكن أن يرتاح الدوّار؛ يجب أن يبذل شغلا ليجعل أقطابه تصطف مع الملف، ويبذل شغلا إضافيا لكي يُلغي ذلك الاصطفاف. كل القدرة الكهربائية المستهلكة من قبل المصباح تُستخلص من دوّار المولّد كقدرة ميكانيكية.
لا شيء يجعل هذا الانتقال في القدرة أوضح من إدارة دوّار مولّد صغير باليد؛ يمكنك أن تشعر بالمصباح يستخلص طاقة منك حينما تدير الدوّار. وكلما زادت القدرة التي يستهلكها المصباح، أصبح تيار الملف المستحث ومجاله المغنطيسي أكثر شدة وزادت الطاقة الميكانيكية التي يجب أن توفرها لإبقاء الدوّار يدور.
بالطبع، تشغَّل معظم المولّدات بأشياء عدا الناس. فتحصل المولّدات الصناعية المعتادة على شغلها الميكانيكي من توربينات بخارية، باستخدام البخار الناتج من الوقود الأحفوري مثل الفحم، والزيت، والغاز الطبيعي أو اليورانيوم. وتستخدم مولّدات صناعية أخرى مصادر متجددة مثل الماء أو الرياح لتشغيل توربيناتها. وفي العادة تستخدم المولّدات التجارية الصغيرة أو المنزلية محركات غازية أو ديزل لإبقاء دوّارها يدور.

تحقق من فهمك #١: ركوب الدراجات بقوة (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

عندما تحرك دوّاسات دراجة رياضية متطورة، فمن المحتمل أنك تدير دوّار مولّد كهربائي. يوفّر هذا المولّد قدرة لفتيلة تسخين لها مقاومة كهربائية قابلة للتعديل. كيف يمكن للدراجة أن تغيّر تلك المقاومة الكهربائية لجعل تحريك الدوّاسات أصعب؟

تردد المولّد وفولطيته الناتجة

يتناسب تردد كهرباء تيار متردد لمولّد مع سرعة دوران دوّاره. ذلك لأن الفولطية الناتجة المترددة للمولّد – أي القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في ملفه – هي نتيجة اندفاع متناغم للأقطاب المغنطيسية لدوّاره مرورا بملفه. هذه القوة الدافعة الكهربائية تنعكس كلما يصطف زوج من الأقطاب مع الملف، فيتطلب اصطفافين لإنتاج دورة واحدة كاملة من التردد في فولطية المولّد الناتجة. بالنسبة لمولّد له زوج واحد من الأقطاب (مثال شكل ١,٣,١١)، تتردد القوة الدافعة الكهربائية مرة واحدة لكل دورة للدوّار.

هكذا يوفّر المولّد في الشكل (١,٣,١١) كهرباء تيار متردد ذات 60Hz عندما يدور دوّاره 60 دورة في كل ثانية. إذا كان دوّاره مغنطيساً أكثر تعقيدا بزوجين من الأقطاب بدلا من زوج واحد، فسيكون عليه أن يدور 30 دورة فقط في كل ثانية لإنتاج كهرباء تيار متردد ذات 60Hz. هذه العلاقة بين معدل الدوران والتردد تفسّر لماذا كل مولّد شبكة الكهرباء الأمريكية ذات 60Hz يدور إما 60 دورة في الثانية أو كسراً صحيحاً من ذلك المعدل. في شبكة الكهرباء الأوربية ذات 50Hz، المعدل الأساسي هو 50 دورة في الثانية. وبسبب أن فولطياتها الناتجة يجب أن تتردد سوية كشيء واحد، فإن جميع المولّدات في شبكة الكهرباء يجب أن تدير دوّاراتها بشكل متزامن. فكل شبكة كهرباء تُشابه رقصاً إيقاعياً جيّداً يكون فيه إيقاع كل راقص منتظماً مع إيقاعات باقي الفريق دائما.

إضافة إلى المحافظة على التردد الصحيح، فإنه يجب على المولّد أن ينتج الفولطية الصحيحة؛ أي على دوّاره أن يحث القوة الدافعة الكهربائية الصحيحة في ملفه. تعتمد تلك القوة الدافعة الكهربائية المستحثة على ثلاثة عوامل: عدد اللفات في الملف، وشدة المجال المغنطيسي، والتردد الذي يتردد به ذلك المجال المغنطيسي. إن زيادة أي من تلك العوامل سيزيد من القوة الدافعة الكهربائية للملف وبالتالي الفولطية الناتجة من المولّد.

إن زيادة عدد اللفات في ملف المولّد هي تماما مثل زيادة عدد اللفات في الملف الثانوي للمحوّل: كلما زادت عدد مرات دوران سلك الملف حول المجال المغنطيسي المتردد للمولّد، زاد الشغل الذي يستطيع أن يقوم به المجال الكهربائي الناتج على الشحنات في ذلك السلك وزادت القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف. فكما في المحوّل، فإن الفولطية الناتجة في المولّد تتناسب مع عدد اللفات في ملفه.

تؤثر شدة وتردد المجال المغنطيسي على الفولطية الناتجة من المولّد لأن كليهما يؤثر على المجال الكهربائي في الملف. تنتج المجالات المغنطيسية الأكثر شدة والأسرع تغيرًا مجالات كهربائية أكثر شدة وبالتالي قوات دافعة كهربائية أكبر في الملف. إن مولّد كهرباء تيار متردد الجيّد يوفّر دائما كهرباء عند فولطيته وتردده المحددين. بما أن معدل دوران دوّاره يؤثر في هاتين الخاصيتين، فإن للمولّد نظام تحكّم ليُبقي دوّاره يدور بثبات بغض النظر عن مقدار القدرة الكهربائية المستهلكة. عندما تصل مصابيحَ إضافية للمولد، بحيث يستخلص التيار شغلاً ميكانيكياً أكبر من دوّاره، فإن نظام التحكم هذا يزيد من تدفق البخار أو الوقود بحيث يحافظ الدوّار على معدل دورانه. يمكنك سماع هذه الاستجابة التلقائية في المولّد العامل بالغازولين أو الديزل؛ عندما تصل آلات أكثر، فإن نظام التحكم يزيد من قدرة المحرك.

بدوران دوّار المولّد بثبات، فإن الفولطية الناتجة من المولّد ستصبح ثابتة نسبيا. ولكن يمكن زيادة تثبيت تلك الفولطية بتعديل إما عدد اللفات في ملف المولّد أو شدة المجال المغنطيسي. المولّد الذي ينظم فولطيته الناتجة آلياً يستخدم في العادة مغنطيساً كهربائياً في دوّاره، جاعلا ذلك المغنطيس الكهربائي أقوى أو أضعف لرفع أو خفض الفولطية الناتجة من المولّد، على التوالي.

وأيضا من المألوف أن يسمح لك المولّد باستخدام فقط جزء من ملفه للحصول على قوة دافعة كهربائية أصغر وبالتالي فولطية ناتجة أصغر. فمثلا، يوفّر مولّد الطوارئ المنزلي الاعتيادي كهرباء تيار متردد 240V من ملفه الكامل وكهرباء تيار متردد 120V من أي نصفي ملفه. مخرج الكهرباء ذات 120V في هذا المولّد يتصل بنصف الملف بينما مخرج الكهرباء ذات 240V يتصل بكامل الملف. يمكنك حتى استخدام الفولطيتين من نفس المولّد في نفس الوقت!

تحقق من فهمك # ٢: التضاؤل التدريجي (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

أثناء فترات الاستهلاك المفرط للكهرباء، تُخفّض أحيانا شبكة الكهرباء من الفولطية التي توفرها بمقدار 5% تقريبا. ما الذي يمكن أن يقوم به المولّد لتخفيض فولطيته الناتجة دون تغيير تردده؟

المحركات الكهربائية ذات التيار المتردد: تحول القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية

يحوّل المحرك القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية. إذا كنت متعجبا من وجود المحركات في نفس قسم المولّدات فتذكّر أن المولّد يحوّل القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية. كما يمكنك أن ترى، هذان الجهازان هما عكس بعضهما.

يمكنك إذاً أن تتوقع أن المحركات والمولّدات لهما تركيبان عكسيان. ليس بالضبط، ففي الحقيقة، المحركات والمولّدات لهما نفس التركيب؛ الشيء المعكوس فيهما هو اتجاه تدفق تيارهما. فبالرغم من أنهما في الغالب متخصصان لأداء غرض ما أو آخر، إلا أنه يمكنك أحياناً أن تجعل المولّد يعمل كمحرّك والعكس بالعكس. فقط اعكس التيار!

يجب أن لا يأتي تأثير عكس التيار في المولّد كمفاجأة تامة لك. لقد رأينا سابقا أن الشغل الميكانيكي الذي يستخلصه المولّد من دوّاره مقداره صفر عندما يكون التيار صفراً ويرتفع بالتناسب مع التيار الذي يدفعه المولّد خلال المصباح. الشيء الذي لم نأخذه في الاعتبار هو ماذا يحدث إذا هبط التيار لأقل من صفر – إذا سار في عكس اتجاه تدفقه الاعتيادي خلال المصباح. في تلك الحالة، يجب أن يهبط الشغل الميكانيكي المستخلص من الدوّار أيضا لأقل من صفر: يجب أن يوفّر المولّد

شغلا ميكانيكيا لدوّاره وبالتالي يصبح محركاً!

لكن التيار الذي نقوم بعكس اتجاهه هو تيار متردد، فكيف «نعكسه»؟ بما أنه من الطبيعي أن يدفع المولّد التيار خارج طرف ملفه الذي يكون عند فولطية أعلى في تلك اللحظة، فإن الانعكاس يعني دفع التيار إلى داخل ذلك الطرف من الملف. أثر هذا الانعكاس هو جعل «المولّد» يستهلك قدرة كهربائية بدلا من أن ينتجها. أي أنه يعمل كمحرك.

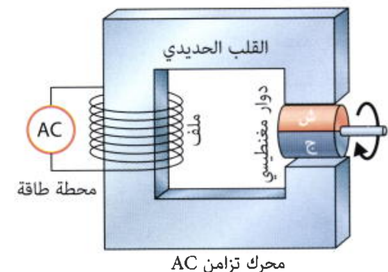
يمكن أن يُفسّر هذا الانتقال من مولّد إلى محرك أيضا بدلالة انعكاس قوى مغنطيسية. إن عكس التيار المتردد في الملف يُبدّل أقطابه المغنطيسية بحيث تدفع على الدوّار فيما كانت سابقا تسحبه وتسحبه فيما كانت سابقا تدفعه. والآن، حينما يندفع الدوّار ليصطف مع الملف، فإن الملف يجذب القطب المقترب ويبذل شغلا عليه. وحينما يستمر الدوّار مندفعاً بعيدا عن الاصطفاف، فإن الملف يتنافر مع القطب المبتعد ومرة أخرى يبذل شغلا عليه. إجمالا، أصبحت القدرة الكهربائية في الملف قدرة ميكانيكية في الدوّار – سمة المحرك المميزة.

إنه محرك كهربائي ذو تيار متردد تزامني – نوع من أنواع المحركات يدور فيه دوّاره بتزامن تام مع تيار من مصدر قدرة كهربائية ذات تيار متردد (شكل ٢,٣,١١). عندما يكون هذا النوع من المحركات موصولاً في مقبس كهربائي 60Hz، فإن دوّاره يدور بالضبط 60 دورة في الثانية، أو بكسر صحيح من هذا المعدل إذا كان للدوّار أزواج قطبية متعددة.

إن الالتزام التام لمحرك تزامن ذو تيار متردد بتردد كهرباء ذات تيار متردد يجعله محرّكاً ثابتاً ودقيقاً، لكن أيضا صعب التشغيل. إذا لم يكن دوّاره يدور أو إذا كان يدور بالسرعة الخاطئة، فإن الأقطاب المغنطيسية المترددة للملف ستدفع أو تسحب على الدوّار بشكل شاذ وقد لا يدور الدوّار بشكل صحيح أبداً. لهذا، معظم محركات التيار المتردد المتزامنة العملية لها أجزاء إضافية وأحياناً ملفات متعددة لمساعدة دوّاراتها على بدء الدوران في الاتجاه المطلوب والوصول لمعدلات الدوران الصحيحة.

إن التشابه بين الشكلين (١,٣,١١) و(٢,٣,١١) يثير سؤالاً مهماً: إذا كان المولّد والمحرك هما نفس الجهاز ووصلتَ أحدهما بشبكة كهرباء ذات تيار متردد، ما الذي يُحدد ما إذا كان سيعمل كمولّد أو كمحرك؟ الإجابة الأساسية لذلك السؤال هي بسيطة بشكل مدهش: هو يعمل كمولّد عندما تبذل شغلاً على دوّاره ويعمل كمحرك عندما تستخلص شغلا من دوّاره!
يستجيب لك الجهاز بهذه الطريقة لكي يُبقي دوّاره يدور بالتزامن مع شبكة الكهرباء الموفرة للتيار المتردد. إذا حاولت أن تزيد من سرعة الدوّار بلفه إلى الأمام وبذل شغل عليه، فإن الجهاز يعمل كمولّد: يستخلص قدرة ميكانيكية منك ويوفّر قدرة كهربائية للشبكة. باللف للأمام ستكون قد دفعت اتجاه الدوّار للنقطة التي ستتنافر عندها أقطابه حينما تتحرك لتصطف مع الملف وتنجذب حينما تستمر في التحرك مبتعدة عن الاصطفاف – وهذه هي القوى في المولّد.

على الجانب الآخر، إذا حاولت أن تبطئ الدوّار بلفه إلى الخلف وجعله يبذل شغلا عليك، فإنه يعمل كمحرك: يستخلص قدرة كهربائية من الشبكة ويوفّر لك قدرة ميكانيكية. باللف للخلف ستكون قد سحبت اتجاه الدوّار للنقطة التي ستتجاذب عندها أقطابه حينما تتحرك لتصطف مع الملف وتتنافر حينما تستمر في التحرك مبتعدة عن الاصطفاف – وهذه هي القوى في المحرك.
وإذا تركت ببساطة الدوّار الذي يدور حول نفسه ليتحرك بحرية، فإنه سيوجّه نفسه بين هاتين الزاويتين القصويتين بحيث يبذل الملف الكهرومغنطيسي شغلا متوسطا عليه مقداره صفر.



شكل ٢,٣,١١: محرك التزامن ذو التيار المتردد هذا يشابه المحوّل الموضح في الشكل (٧,٢,١١)، إلا أن الكهرباء تغادره من خلال حركة دوران دوّاره المغنطيسي، بدلا من خلال تيار كهربائي في ملف ثانوي.

تحقق من فهمك # ٣: إدارة أيادي الزمن (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

قبل عصر ساعات الكوارتز، كانت الساعة الكهربائية الاعتيادية تستند على محرك تزامن ذو تيار متردد. كان يدير دوّار المحرك ببساطة مجموعة من التروس والتي كانت تُقدّم عقارب الساعة. لماذا تعتمد دقة مثل هذه الساعة على دقة تردد شبكة الكهرباء؟

محركات كهربائية ذات تيار مستمر

بما أن أكثر الأجهزة المتنقلة تعمل بالبطاريات والتيار المستمر، فإنها لا يمكنها أن تستخدم محركات تزامنذات تيار متردد لإدارة أجزائها. إذا أرسلت تيارا مستمرا خلال ملف محرك تزامن ذا تيار متردد، فإن ذلك الملف سيعمل كمغنطيس دائم ولن يدور الدوّار. بدلا من ذلك، فالتجاذب بين الأقطاب المختلفة سوف يدفع الدوّار للاصطفاف مع الملف ولن يتحرك مرة أخرى. باقتراب أقطاب الدوّار بأقطاب الملف المختلفة إلى أقصى حد ممكن، فإن الدوّار سيكون في اتزان مستقر.

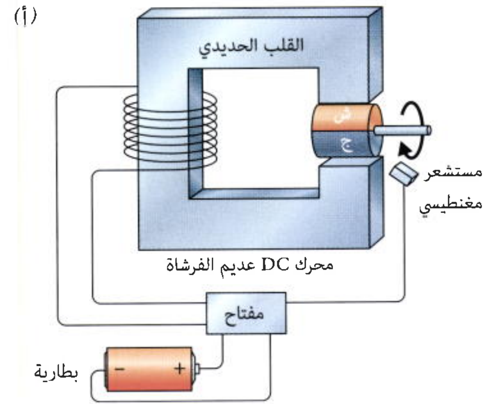
للإبقاء على دوران الدوّار، يجب أن يقوم شيء ما بعكس مغنطيسية الملف كلما يصل الدوّار لهذا الاتزان المستقر. هذا الانعكاس سيحوّل التجاذب إلى تنافر وفجأة سيجد الدوّار نفسه في اتزان غير مستقر. وبدلا من التوقف، سيستمر الدوّار بالدوران باحثا عن اتزان مستقر جديد. لكن عندما يصل له، ستنعكس مغنطيسية الملف مرة أخرى. وهكذا سيدور الدوّار إلى الأبد، محاولا أن يصُفّ أقطابه مع أقطاب الملف المخالفة لكنه لن ينجح أبدا. هي أسطورة سيزيفس - دحرجة صخرة كبيرة لأعلى جبل، فقط لتتدحرج مرة أخرى للأسفل عندما تقترب من القمة - متحققة في جهاز كهروميكانيكي.

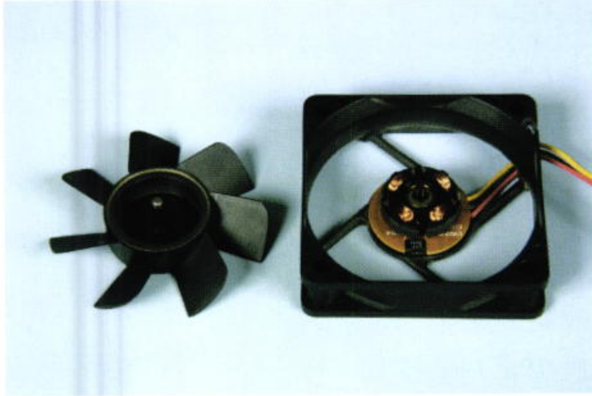
إن عملية قلب مغنطيسية الملف هي ببساطة عملية عكس تياره. كل ما هو مطلوب مفتاح يبدل السلكين اللذين يصلان الملف بالبطارية. كلما وصل الدوّار للاصطفاف مع أقطاب الملف المخالفة، فإن هذا المفتاح يُبدل التوصيلات بشكل مفاجئ وبالتالي يعكس تيار الملف ومغنطيسيته.

يمكن إيجاد مثل هذا المفتاح في كل محرك كهربائي ذا تيار مستمر تقريباً، لكن محركات التيار المستمر المختلفة تستخدمه بطرق مختلفة. هناك على الأقل طريقتان مألوفتان، والتي تُستخدم في نوعين على الأقل من أنواع محركات التيار المستمر: محرك ذو فرشاة ومحرك بلا فرشاة.

إن محرك تيار مستمر بلا فرشاة ما هو إلا محرك تيار متردد تزامني مضاف إليه مفتاح عالي التقنية يعكس التيار كلما اصطفت أقطاب الدوّار مع أقطاب الملف الساكن المخالفة (شكل ٣,٣,١١ أ). بالرغم من أن مفاتيحها عالية التقنية تجعلها باهظة الثمن نسبيا، إلا أن هذه المحركات العديمة الفرشاة تدور بهدوء وأمان لسنوات دون صيانة. تدور المراوح التي تبرّد جهاز حاسبك الآلي بمحركات بلا فرشاة (شكل ٣,٣,١١ ب).

يضع محرك تيار مستمر ذو فرشاة ملفه الكهرومغنطيسي على الدوّار ويدفعه بواسطة مغنطيس دائم ساكن (شكل ٤,٣,١١ أ). ذلك التغيير غير مهم إلا أن الآن الدوّار هو الذي يغيّر أقطابه كلما تصطف مع الأقطاب المخالفة للمغنطيس الدائم. أهمية هذا التغيير هي أنه يسمح للمحرك باستخدام مبدّل بسيط ورخيص يُسمى المبدّل للتحكم في اتجاه تدفق التيار في ملفه.
في أبسط أشكاله، يحتوي المبدّل على لوحين مقوسين مثبتين بالدوّار ومتصلين بطرفين متعاكسة لملف الدوّار. يتدفق التيار الكهربائي إلى الدوّار خلال فرشاة موصلة للتيار والتي تُلامس أحد هذين اللوحين ويغادر التيار الدوّار خلال فرشاة ثانية تلامس اللوح الآخر. حينما يدور الدوّار، تلامس كل فرشاة أحد اللوحين ثم تلامس الآخر. كلما يُكمل الدوّار نصف دورة، فإن هاتين الفرشتين تقايضان اللوحين وتنقلب أقطاب الدوّار المغنطيسية. اللوحان مرتبان بحيث يحدث هذا الانعكاس فقط عندما تصطف الأقطاب المتعاكسة، لذا فإن الدوّار يدور للأبد.

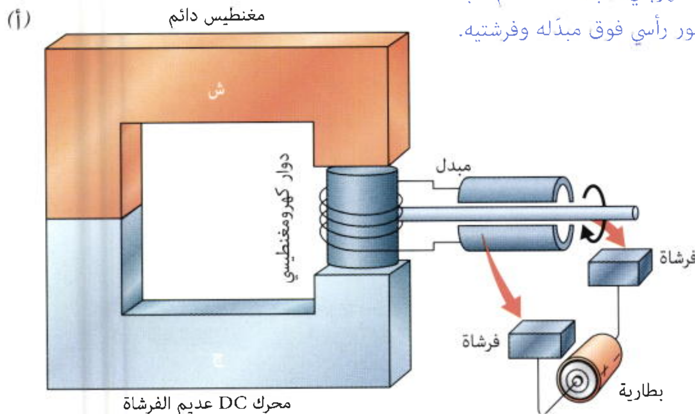


بإذن لو بلومفيلد


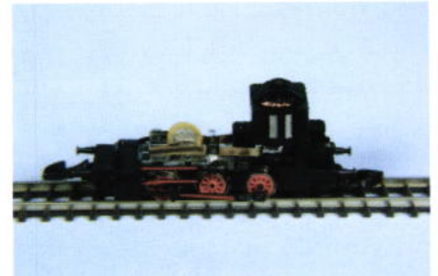
شكل ٣,٣,١١: (أ) يستخدم محرك تيار مستمر عديم الفرشاة مغنطيساً كهربائياً لإدارة دوّاره المغنطيسي. يرصد مستشعر اتجاه الدوّار ويعكس التيار في المغنطيس الكهربائي كلما يصطف الدوّار مع المجال المغنطيسي. (ب) تستخدم مروحة الكمبيوتر هذه محرك تيار مستمر عديم الفرشاة. يستوعب الحيز داخل المغنطيس الدائم الحلقي الشكل للدوّار مغنطيساً كهربائياً ساكناً ذا أربعة أقطاب. المستشعر المغنطيسي الأسود يوجد تحت المغنطيسات الكهربائية.

في حين تكون محركات التيار المستمر ذوات الفرشاة أقل ثمناً من العديمة الفرشاة، إلا أن احتكاك الانزلاق في مبدّلاتها يتلفها تدريجيا (شكل ٤,٣,١١ ب). علاوة على ذلك، يؤدي التلامس الكهربائي غير الجيّد بين الفرشتين واللوحين إلى إحداث شرر، لذا فإن المحركات ذوات الفرشاة تكون بالعموم غير مناسبة للاستخدام بالقرب من الغازات أو السوائل القابلة للاشتعال. تكون محركات التيار المستمر عديمة الفرشاة أكثر ملاءمة للمهام التي تتطلب العمل الطويل والمستمر أو عندما يُشكل الشرر خطورة.

إن محركات التيار المستمر ذوات الملف الواحد والتي ناقشنها للتو كثيراً ما لديها مشكلة في بدء التشغيل ويمكن أن تدور في أي من الاتجاهين عند ذلك. لبدء تشغيل المحرك بطريقة معتمدة ولإدارته في اتجاه محدد، فإن محركات التيار المستمر الأكثر عملية لها أكثر من ملف وتبعا لذلك مفاتيح أكثر تعقيدا. ولكن هذه التحسينات تجعل هذه المحركات أكثر حساسية للاتجاه الإجمالي لتدفق التيار. عندما تعكس البطاريات التي تُشغّل محرك تيار مستمر جيّداً، فإن التيار في كل مكان في ذلك المحرك ينعكس وكذلك جميع أقطاب المغنطيسات الكهربائية الخاصة به. بما أن المغنطيسات الدائمة للمحرك لا تتغيّر، فإن القوى المؤثرة على الدوّار تنعكس - فيصبح التجاذب تنافراً والعكس بالعكس. نتيجة لذلك، يدور المحرك عكسيا.



شكل ٤,٣,١١: (أ) يدير محرك تيار مستمر ذو فرشاة دوّاره الكهرومغنطيسي في مجال مغنطيس دائم. كلما يصطف الدوّار مع المجال المغنطيسي، فإن مبدّله يعكس التيار في المغنطيس الكهربائي. (ب) تستخدم لعبة القطار هذه محرك تيار مستمر ذا فرشاة. يدور دوّاره الكهرومغنطيسي حول محور رأسي فوق مبدّله وفرشته.

بإذن لو بلومفيلد


تحقق من فهمك # ٤: محرك دائم (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

أملا في تجنب استخدام البطاريات، يستبدل مخترعٌ المغنطيسات الكهربائية في محرك تيار مستمر بمغنطيسات دائمة. يمتنع دوّاره عن الدوران. لماذا لا يستطيع محرك المغنطيس الدائم أن يعمل؟

سرعة الدوران ومولّدات التيار المستمر الكهربائية

لقد رأينا ما الذي يجعل دوّار محرك التيار المستمر يدور، لكن لم نرَ ما الذي يحدد سرعة دورانه. بما أن المحرك فعلياً يصنع تياره المتردد بذاته، ألن يدور دوّاره أسرع وأسرع إلى الأبد؟ الإجابة هي لا. يدور دوّاره بمعدل معيّن يتناسب مع الفولطية الموفرة للملف. أساس هذا المعدل الطبيعي هو الحثّ: حينما يدور الدوّار، يواجه الملف قوة دافعة كهربائية مستحثة وهذه بدورها تحُدّ من معدل دوران الدوّار.

أول ما تصل المحرك بالبطارية ودوّاره ساكن، فإن الهبوط الفولطي للبطارية يدفع تيارا خلال ملفه من الفولطية الأعلى إلى الفولطية الأقل. لكن بمجرد أن يبدأ الملف بالدوران، فإن قوة دافعة كهربائية تظهر في الملف وتعارض تدفق ذلك التيار. تكبر تلك القوة الدافعة الكهربائية مع زيادة سرعة الدوار إلى أن تصبح كبيرة بما تكفي لإيقاف تدفق التيار تماما. عند ذلك تصبح القوة الدافعة الكهربائية المستحثة مساوية للهبوط الفولطي المفروض من البطارية فيدور الدوّار بمعدله الطبيعي. كلما ازدادت صعوبة مساواة القوة الدافعة الكهربائية للمحرك بفولطية البطارية، تطلب ذلك زيادة دوران الدوّار ليصل لمعدله الطبيعي. وبالتالي، فإن زيادة فولطية البطارية، أو إضعاف المغنطيس الدائم للمحرك، أو تقليص عدد اللفات في ملفه (ملفاته) كل ذلك سيزيد من المعدل الطبيعي لدوران المحرك.

بمجرد أن يبدأ دوّاره بالدوران بذلك المعدل الطبيعي، فإن المحرك يعارض أي تغيّر إضافي في معدل الدوران. إذا حاولت تبطئة الدوّار بلفه للخلف، فإن المحرك سيبدأ بسحب تيار من البطارية مرة أخرى. سوف يحوّل قدرة كهربائية لتيار مستمر إلى قدرة ميكانيكية لمنع الدوّار من التباطؤ.

ولكن إذا حاولت إسراع الدوّار بلفه إلى الأمام، فإن القوة الدافعة الكهربائية للمحرك ستبدأ بدفع التيار في الاتجاه المعاكس. سوف تحوّل القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية لتيار مستمر لمنع الدوّار من التسارع. ببذل شغل على الدوّار بهذه الطريقة، سوف تتسبب في تدفق التيار عكسيا خلال البطارية وتعيد شحنها. سوف يعمل محرك تيار مستمر كمولّد تيار مستمر!

بعد رؤية أن محركات التيار المتردد ومولّدات التيار المتردد هي نفسها، فإنه ليس من المدهش أن محركات التيار المستمر ومولّدات التيار المستمر هي في الغالب نفسها أيضا. إذا بذلت شغلا على دوّار محرك تيار مستمر ذي فرشاة، فإنه سيتصرف كمولّد تيار مستمر. استخدم أديسون مثل هذه المولّدات ذات التيار المستمر في محطاته لتوليد الكهرباء في مدينة نيويورك. محركات التيار المستمر عديمة الفرشاة تكون أكثر حساسية بسبب مفاتيحها العالية التقنية، لكن بعضها يمكنه أن يعمل كمولّد تيار مستمر أيضا.

تحقق من فهمك # ٥: السيارات الهجينة (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

تستخدم سيارتك الهجينة الجديدة محرك تيار مستمر خاصاً لإدارة عجلاتها. عندما تتسارع عند الإشارة المرورية الخضراء، فإن بطارية السيارة تُشغّل المحرك، والذي يدفع العجلات. لكن عندما تدوس على المكابح عند إشارة المرور الحمراء، فإن العجلات تُشغّل المحرك، والذي يعيد شحن البطارية. كيف يكون هذا الانعكاس ممكناً؟

المحركات العامة

إذا وصلت محرك تيار مستمر ذا فرشاة بمقبس كهرباء تيار متردد، فإن دوّاره سيهمهم بدلاً من أن يدور. ذلك لأن الدوّار يحاول أن ينعكس كلما تنعكس فولطية مقبس التيار المتردد ولا يمكنه أن يحقق أي تقدم في أي اتجاه.

لكن إذا استبدلت المغنطيس الساكن في محرك تيار مستمر ذي الفرشاة بمغنطيس كهربائي ووصلت ذلك المغنطيس الكهربائي بنفس مصدر كهرباء بقية المحرك، فستكون قد صنعت محركاً عاماً (شكل٥,٣,١١ أ). وكما يشير اسمه، فإن هذا المحرك سيدور بشكل جيّد عند تشغيله بأي من التيارين المستمر أو المتردد.
لفهم مرونة المحرك العام، دعنا ننظر ماذا يحدث عندما توفّر كهرباء تيار مستمر له. سوف يتمغنط المغنطيس الكهربائي الساكن في اتجاه واحد مثل المغنطيس الدائم وسيدور الدوّار كما لو أنه كان في محرك تيار مستمر. لكن هناك اختلافاً مهماً: الدوّار في محرك عام لن يدور عكسيا عندما تعكس الفولطية الداخلة. سيستمر بالدوران في نفس الاتجاه لأن انعكاس التيار سيعكس كل قطب في المحرك وبالتالي يُبقي القوى المغنطيسية للمحرك بلا تغير. إذا أردت أن تجعل المحرك العام يدور عكسيا، يجب أن تبدل أسلاك مغنطيسه الكهربائي الساكن.

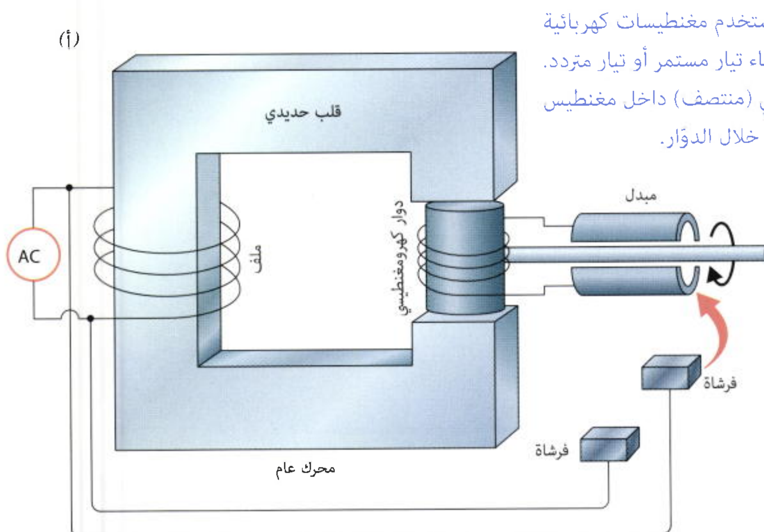
بما أن دوّاره يدور في اتجاه ثابت، بغض النظر عن اتجاه تدفق التيار، فإن المحرك العام يعمل بشكل جيّد بكهرباء تيار متردد. ومثل محركات التيار المستمر والتي على نموذجها صُنع المحرك العام، فإن سرعة المحرك العام تتحدد بواسطة الفولطيات والتيارات بدلا من تردد كهرباءالتيار المتردد. المحركات العمة مرنة ويُعتمد عليها وموجودة في أجهزة منزلية مثل الخلّاط والخافق والمكنسة الكهربائية (شكل ٥,٣,١١ ب).

تحقق من فهمك # ٦: لا عودة

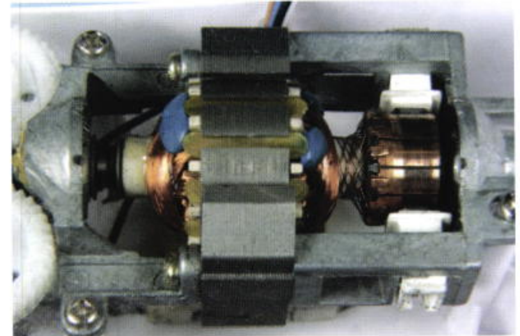
(للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

تحاول أن تُعد قشدة مخفوقة أثناء عطل كهربائي ولا يعمل خلّاطك الكهربائي. لذا، تجمّع عدداً كبيراً من البطاريات القلوية في سلسلة تكوّن 120volt وتوفّر تياراً مستمراً للخلّاط. يعمل الخلّاط بشكل جيد! للمتعة، تقوم بعكس البطاريات ولكن الخلّاط يستمر بالدوران في نفس الاتجاه. لماذا لا ينعكس دوران الخلّاط عندما تعكس اتجاه التيار المتدفق خلاله؟

شكل ٥,٣,١١: (أ) يشابه المحرك العام محرك التيار المستمر، إلا أنه يستخدم مغنطيسات كهربائية فقط. بما أنه لا يتأثر باتجاه تدفق التيار في أسلاكه، فيمكن تشغيله بكهرباء تيار مستمر أو تيار متردد. (ب) يستخدم هذا الخلّاط محركا عاماً. يدور دوّاره الكهرومغنطيسي (منتصف) داخل مغنطيس كهربائي ساكن، بينما يتحكم مبدّله وفرشاته (يمين) في اتجاه تدفق التيار خلال الدوّار.



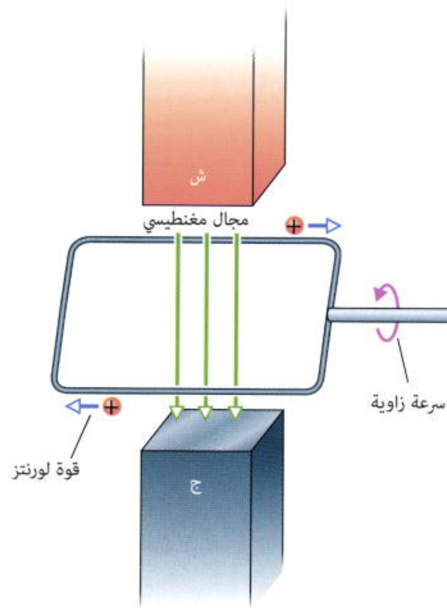
بإذن لو بلومفيلد

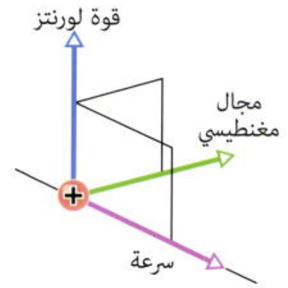


المحركات الحثّيّة

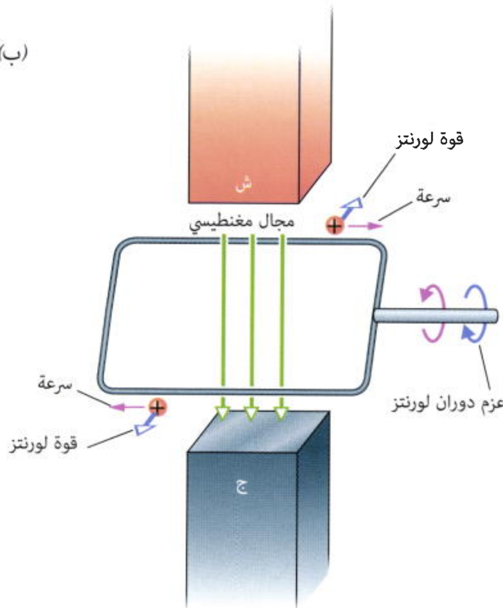
آخر أنواع محركاتنا هو الأكثر تعقيدا من حيث المفهوم: المحرك الحثّي. إن دوّاره ليس مغنطيساً دائماً ولا مغنطيساً كهربائياً اعتيادياً؛ هو مجموعة من الملفات الموصلة والتي تتمغنط بالحث فقط. عندما يُعرّض المحرك هذا الدوّار إلى مجال مغنطيسي دوراني، فإنه يواجه قوى كهرومغنطيسية تجعله يدور مع ذلك المجال.

لفهم القوى المؤثرة على هذا الدوّار، لنبدأ بالنظر في سلك حلقي الشكل في مجال مغنطيسي ساكن (شكل ٦,٣,١١). طالما أن تلك الحلقة ساكنة، فإنها لا تحمل أي تيار ولا تواجه أي قوى. لكن عندما تبدأ الحلقة بالدوران خلال المجال (شكل ٦,٣,١١ أ)، فإن قوة جديدة تعمل على شحناتها الكهربائية المتحركة: قوة لورنتز.





شكل ٧,٣,١١: تواجه الشحنة الموجبة التي تتحرك خلال مجال مغنطيسي قوة عمودية على كل من سرعتها والمجال المغنطيسي. تواجه الشحنة السالبة قوة في الاتجاه المعاكس.



شكل ٦,٣,١١: (أ) عندما تدور حلقة من سلك خلال مجال مغنطيسي، فإن شحناتها المتحركة تواجه قوى لورنتز على طول السلك وتبدأ بالتحرك كتيار حول الحلقة. (ب) تواجه الشحنات الدائرة قوى لورنتز إضافية عمودية على السلك ذاته وتنتج عزماً على الحلقة يعارض دورانها.

سُمّيت هذه القوة بهذا الاسم نسبة لمكتشفها، الفيزيائي الهولندي هندريك أنطون لورنتز (١٨٥٣ - ١٩٢٨م)، وتؤثر قوة لورنتز على شحنة متحركة خلال مجال مغنطيسي. تدفع هذه القوة الشحنة بزاوية عمودية على كل من سرعتها والمجال المغنطيسي (شكل ٧،٣،١١). تتناسب شدة قوة لورنتز مع الشحنة، والسرعة، والمجال المغنطيسي، وجيب الزاوية بين السرعة والمجال المغنطيسي.

أخيرا، يتبع اتجاه قوة لورنتز على شحنة موجبة قاعدة اليد اليمنى: عندما يشير إصبع سبابتك الممتد نحو سرعة الشحنة وإصبعك الأوسط المنثني يشير على طول المجال المغنطيسي، فإن القوة على الشحنة تشير على طول إبهامك الممتد. تواجه الشحنة السالبة قوة في الاتجاه المعاكس. يمكن كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية،

القوة = الشحنة · السرعة · المجال المغنطيسي × جيب الزاوية (١،٣،١١)

ورمزيا: $F = qvB \times \sin\,(\text{angle})$

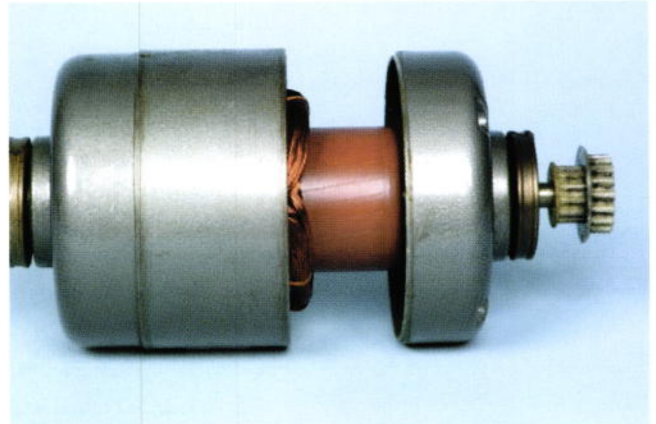
وفي لغة الحياة اليومية: عندما تواجه أجسام مشحونة من الشمس مجال الأرض المغنطيسي، فإنها تُدفع في مسارات حلزونية، منتجة الأضواء القطبية الشمالية والأضواء القطبية الجنوبية،

حيث الزاوية المذكورة في العلاقة هي بين السرعة والمجال المغنطيسي، واتجاه قوة لورنتز يتبع قاعدة اليد اليمنى.

عندما تدور حلقتنا السلكية، فإنها تحمل شحناتها المتحركة خلال المجال المغنطيسي الساكن وتواجه تلك الشحنات قوى لورنتز. بما أن جانبي الحلقة يتحركان عكس بعضهما، فإن الشحنات في تلك الجوانب تدفع في اتجاهين متعاكسين على طول السلك وتبدأ بالدوران حول الحلقة كتيار - تيار مستحث!

الآن، بتحرك الشحنات حول الحلقة السلكية، فإن قوة لورنتز تعمل مرة أخرى (شكل ٦،٣،١١ ب). فهي تدفع الشحنات نحو أطراف السلك، لكن في اتجاهين متعاكسين في الجانبين المتعاكسين للحلقة. بما أن الشحنات لا يمكنها مغادرة السلك، فإنها تدفعها معها فتواجه الحلقة ككل عزماً. يتجه ذلك العزم عكس السرعة الزاوية للحلقة - أي يعمل على تبطئة دوران الحلقة خلال المجال. هذا هو قانون لينز مرة أخرى: بما أن تيار الحلقة المستحث ينشأ بواسطة دورانها في المجال المغنطيسي، فإن تأثير ذلك الحثّ هو عزم يعاكس دوران الحلقة.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٨،٣،١١: يحيط هذا المحرك الحثّي المفكك قفص سنجابه الأحمر بملفات كهرومغنطيسية ساكنة. يدور مجال الملفات المغنطيسي حول الدوّار والدوّار يدور معه. لرفع كفاءة المحرك، فإن الدوّار له صفائح حديدية داخل حلقات توصيله.

من الواضح أن حلقة من السلك تجد صعوبة في الدوران في وجود مجال مغنطيسي ساكن. ومن المدهش أن لها نفس الصعوبة في عدم الدوران في وجود مجال مغنطيسي دوراني! هكذا يدير المحرك الحثي دوّاره: يستخدم مغنطيسات كهربائية لعمل مجال مغنطيسي يدور في الفراغ، ودوّاره الشبيه بالحلقة يدور مع ذلك المجال. في حين من الكافي وجود حلقة واحدة في الدوّار، إلا أن الدوّارات الأكثر فعّالية تحتوي على العديد من الحلقات الموصلة. الدوّار التقليدي هو «قفص السنجاب»، سُمّي كذلك لأنه يُشابه عجلة تدريب الحيوانات (شكل ٨,٣,١١).

بالرغم من أن الدّوار يحاول أن يتبع المجال المغنطيسي الدوراني بشكل تام، إلا أنه لا يجاريه تماما. وإذا استطاع ذلك، فإنه لن يتدفق أي تيار خلاله ولن يواجه أي عزم كهرومغنطيسي على الإطلاق. فحتى الاحتكاك في محامله ستبطئه. بدلا من ذلك، يدور الدوّار دائما بسرعة أبطأ قليلا من المجال المغنطيسي. وكلما زاد العزم الذي يبذله الدوّار على الآلات التي يديرها، زاد العزم الكهرومغنطيسي الذي يحتاجه وقلت سرعة دورانه التي يحتاجها لكي يتمكن من الحصول على ذلك العزم. عند توفير قدرته الميكانيكية القصوى، فإن الدوّار في محرك حثّي اعتيادي يدور أبطأ ببضع نسب مئوية من مجال المحرك الدوراني.

من المؤسف أن إنشاء مجال مغنطيسي دوراني حقيقي يتطلب وجود مغنطيسيات كهربائية وتيارات معقدة. بالرغم من أنه معتاد في المحيط الصناعي، إلا أن هذا المستوى من التعقيد من الصعب تحقيقه في المنزل. ولهذا فإن معظم المحركات الحثّية المنزلية تستخدم المجالات المغنطيسية المترددة بدلا من الدورانية. ومن المدهش بما فيه الكفاية أنه عندما يدور الدوّار بالمعدل الصحيح، فإنه يستجيب للمجال المغنطيسي المتردد كما لو أنه كان مجالا دورانيا.
يُشابه هذا التأثير شيئاً قد تكون لاحظته بينما تمر بسلك من مصابيح المناسبات التي تضيء وتخبو: إذا سرت بالسرعة الصحيحة، فإن نمط الأضواء الذي تراه يظهر وكأنه يتحرك معك حتى وإن كانت المصابيح الساكنة تضيء وتخبو فحسب. وبالمثل، عندما يدور الدوّار داخل حلقة من المغنطيسات الكهربائية الناتجة من تيار متردد بالزاوية الصحيحة، فإن نمط المغنطيسية قد يبدو أنه يدور معه حتى وإن كانت المغنطيسيات الكهربائية الساكنة تقلب أقطابها فحسب مع كل انعكاس لكهرباء التيار المتردد.

حتى يكون عمليّا، يجب أن يضيف المحرك الحثّي على الأقل بعض الصفات الدورانية لهذا المجال المغنطيسي المتردد. الجزء المتردد من هذا المجال يُبدئ حركة الدوّار ويصله للسرعة المطلوبة، والجزء المتردد يكمل من هذه النقطة.
في المحرك الحثّي الذي لا يحتاج لتوفير الكثير من العزم المبدئي، فإن قليلا من الخاصية الدورانية فقط هو كل ما هو مطلوب لدفع الدوّار تدريجيا ليصل للسرعة المطلوبة. هذا الدوران الطفيف يمكن أن يُنشأ بأجهزة كهرومغنطيسية بسيطة. لكن المحرك الحثّي الذي يجب أن يبذل عزما كبيرا عند بدئه يحتاج مجالاً مغنطيسياً دورانياً حقيقياً، على الأقل إلى أن يصل لمعدله الدوراني المناسب.

تحقق من فهمك # ٧: لورنتز يتحدث (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٥)

تحتوي سمّاعات صوتية اعتيادية على ملف سلكي مغمور في مجال مغنطيسي قويّ. عندما يرسل نظام سمعي تيارات خلال ذلك الملف، فإن الملف يواجه قوة تتناسب مع ذلك التيار. ما هي القوة التي تدفع على الملف؟

دقق في أرقامك # ١: لورنتز يتحدث بدقة (للإجابة، انظر صفحة ٣٧٧)

إذا واجه ملف في سمّاعات صوتية قوة لورنتز مقدارها 1N عندما يحمل تياراً مقداره 1A، ما هي القوة التي سيواجهها عندما يحمل تياراً مقداره 2A وبالتالي جميع الشحنات داخله تسير بضعف السرعة السابقة؟

خاتمة الفصل الحادي عشر

في هذا الفصل، درسنا المغنطيسية والطرق التي ترتبط بها المغنطيسية بالكهرباء. في قسم المغنطيسات المنزلية، اطلعنا على مفهوم القطب المغنطيسي والقوى التجاذبية والتنافرية التي تبذلها الأقطاب على بعضها. فحصنا المواد المغنطيسية ورأينا كيف أن خصائصها المغنطيسية تجعلها مفيدة في أغراض متعددة. كما التقينا بالمغنطيسات الكهربائية وبدأنا نرى أن المغنطيسية ليست مستقلة عن الكهرباء. وفي قسم توزيع القدرة الكهربائية، رأينا كيف أن التيارات الكهربائية المترددة تجعل من الممكن نقل القدرة من دائرة لأخرى عن طريق المحوّل وخصائصه الكهرومغنطيسية. تعلمنا أن تحويل القدرة الكهربائية لفولطيات عالية جدا وتيارات صغيرة يقلل من الكهرباء المهدرة في الطريق بين محطات توليد الكهرباء والمدن.

في المولّدات والمحركات الكهربائية، شاهدنا أنه عندما يتحرك مغنطيس وملف مرورا ببعضهما البعض، فإن الملف يمكنه أن يتصرف كمصدر للقدرة الكهربائية. كما شاهدنا أنه عند توفير قدرة كهربائية للملف، فإن الملف والمغنطيس يمكنهما أن يتحركا مرورا ببعضهما البعض. كان التناظر في هذه الحالة، أي إنتاج القدرة الميكانيكية من القدرة الكهربائية وإنتاج القدرة الكهربائية من القدرة الميكانيكية، شيئا مثيرا.

تفسير: مغناطيس كهربائي ذو مسمار وسلك

عندما تصل السلك من أحد طرفي البطارية للآخر، فإن تيارا يتدفق من الطرف الموجب إلى الطرف السالب خلال السلك. (في الواقع، تتحرك الإلكترونات السالبة الشحنة من طرف البطارية السالب، وخلال السلك، وإلى الطرف الموجب، لكننا تبنينا التخيّل بأن الشحنات الموجبة تتحرك بالاتجاه المعاكس.) ينتج هذا التيار مجالا مغنطيسيا حول السلك. بسبب أن السلك ملفوف حول المسمار، فإن هذا المجال المغنطيسي يمر خلال المسمار ويتسبب في إعادة تعديل حجم نطاقاته المغنطيسية إلى أن يصطف معظمها مع المجال. بدون أي تيار في السلك، فإن النطاقات المغنطيسية في الفولاذ تشير إلى اتجاهات متعددة مختلفة، فيبدو المسمار لامغنطيسياً. ولكن بوجود تيار لتوجيه النطاقات، فإنها سوية تنتج مغنطيسية كبيرة. يصبح المسمار مغنطيسيا ويبذل قوى مغنطيسية شديدة على الأجسام الأخرى القريبة.

ملخص الفصل

كيفية عمل المغنطيسات المنزلية

تتكون مغنطيسات الثلاجة الاعتيادية من مواد مغنطيسية صلدة تم تمغنطها بشكل دائم من قِبل صانعيها. المغنطيسات الزرية البسيطة لها زوج وحيد من الأقطاب المغنطيسية، أحدها شمالي والآخر جنوبي، لكن شرائح المغنطيس البلاستيكية لها في الغالب العديد من الأقطاب. هذه المغنطيسات تلتصق بسطح الثلاجة بواسطة مغنطة مواد ذلك السطح المغنطيسية الرخوة مؤقتاً ثم انجذابها للأقطاب المعاكسة على ذلك السطح.

البوصلة هي مغنطيس دائم آخر، لكن صمم لكي يصطف مع المجال المغنطيسي للأرض. في الواقع، يمكن أن يُرسم ذلك المجال المغنطيسي باستخدام البوصلة. يمكن للمجالات المغنطيسية حول مغنطيسات أصغر أن تُصبح مرئية باستخدام برادة الحديد بدلا من ذلك. لكن المغنطيسات الدائمة ليست هي المصادر الوحيدة للمجالات المغنطيسية: وجدنا أنه عندما يتدفق التيار خلال الملف في جرس الباب، فإنه يصبح مغنطيسيا أيضا - مغنطيس كهربائي.

كيفية عمل توزيع القدرة الكهربائية

لتقليل خسائر القدرة الكهربائية في خطوط نقل الكهرباء بين محطات توليد الكهرباء والمدن، تستخدم أنظمة توزيع القدرة تيارات مترددة ومحوّلات. بالقرب من محطات توليد الكهرباء، تتحوّل القدرة الكهربائية ذات الفولطية المنخفضة نسبيا والتيار المرتفع إلى قدرة ذات فولطية مرتفعة جدا وتيار منخفض لنقلها خلال خطوط الكهرباء عبر المدن. بسبب أن القدرة المستهلكة من قِبل هذه الأسلاك ذات الفولطية العالية تعتمد على مربع التيارات التي تحملها، فإن خسائر القدرة تُقلّل كثيراً بواسطة هذه التقنية. عندما تصل القدرة الكهربائية إلى المدينة، فإنها تتحوّل إلى قدرة ذات فولطية متوسطة وتيار عالٍ للتوزيع للأحياء. أخيرا، تحوّل المحوّلات الخافضة للجهد هذه القدرة في الأحياء إلى قدرة ذات فولطية منخفضة وتيار عالٍ جدا للتوزيع على المنازل والمكاتب المنفردة.

كيفية عمل المولّدات والمحركات الكهربائية

تولّد معظم القدرة الكهربائية كهرومغنطيسيا بواسطة مغنطيسات وملفات دورانية. في المولّد الاعتيادي، يدور مغنطيس دائم حول نفسه داخل ملف سلكي ساكن. حينما يندفع مجال المغنطيس الدائر عبر الملف، فإن الحثّ المغنطيسي ينقل القدرة إلى تيار متدفق خلال ذلك السلك. ذلك التيار ذاته هو مغنطيسي ويستخلص قدرة ميكانيكية من المغنطيس الدائر. إجمالا، يحوّل المولّد قدرة ميكانيكية إلى قدرة كهربائية.

يقوم المحرك الكهربائي بالمهمة العكسية: فهو يحوّل القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية. يستخدم المحرك قوى مغنطيسية لإبقاء الدوّار يلف بمعدل ثبات. يطلق المحرّك - المتكوّن من مغنطيسات كهربائية وغالبا مغنطيسات دائمة - الدوّار في رحلة لانهائية غير ناجحة لصف أقطابه المغنطيسية مع الأقطاب المعاكسة لجسم ثابت. كلما يكاد الدوّار أن يصل هدفه، فإن تغيرًا في تيار في المغنطيس الكهربائي يبدّل أقطابه بحيث يصطف الدوّار مع الأقطاب الخاطئة ويضطر أن يستمر في رحلته.

قوانين ومعادلات مهمة

١. قانون كولوم للمغنطيسية:
مقادير القوى المغنوستاتيكية بين قطبين مغنطيسين تساوي النفاذية في الفراغ مضروبة في حاصل ضرب القطبين مقسومة على 4π في مربع المسافة الفاصلة بينهما، أو (١,١,١١)

$$\text{القوة} = \frac{\text{النفاذية في الفراغ} \times \text{قطب}_1 \times \text{قطب}_2}{(\text{المسافة بين الأقطاب})^2 \times 4\pi}$$

إذا كانت الأقطاب متشابهة، فالقوى تنافرية. إذا كانت الأقطاب متعاكسة، فالقوى تجاذبية.

٢. القوة المبذولة على قطب بواسطة مجال مغنطيسي: يواجه القطب قوة تساوي حاصل ضرب قطبه في المجال المغنطيسي، أو (٢,١,١١)

القوة = القطب × المجال المغنطيسي

حيث تشير القوة في اتجاه المجال.

3. قانون لينز: تُعارض تأثيرات الحث المغنطيسي التغيرات التي تُحدثها.

4. الطاقة في المجال المغنطيسي: طاقة المجال المغنطيسي تساوي مربع ذلك المجال مضروبا في حجمه مقسوما على ضعف النفاذية في الفراغ، أو (٢,٢,١١)

$$\text{الطاقة} = \frac{\text{المجال المغناطيسي}^2 \times \text{الحجم}}{\text{النفاذية في الفراغ} \times 2}$$

٥. فولطيات المحوّل: يعمل الملف الثانوي للمحوّل كمصدر كهرباء تيار متردد بفولطية تساوي الفولطية المطبقة في الملف الابتدائي مضروبة في النسبة بين عدد اللفات الثانوية إلى عدد اللفات الابتدائية أو (٣,٢,١١)

$$\text{الفولطية الثانوية} = \text{الفولطية الابتدائية} \cdot \frac{\text{اللفات الثانوية}}{\text{اللفات الابتدائية}}$$

٦. تيارات المحوّل: التيار المتردد في الملف الثانوي لمحوّل يساوي التيار المتردد في ملفه الابتدائي مضروبا في نسبة عدد اللفات الابتدائية إلى عدد اللفات الثانوية أو (٤,٢,١١)

$$\text{التيار الثانوي} = \text{التيار الابتدائي} \cdot \frac{\text{اللفات الابتدائية}}{\text{اللفات الثانوية}}$$

٧. قوة لورنتز: عندما تتحرك شحنة كهربائية خلال مجال مغنطيسي فإنها تواجه قوة مساوية لحاصل ضرب شحنتها في سرعتها في المجال المغنطيسي في جيب الزاوية بين السرعة والمجال المغنطيسي، أو (١,٣,١١)

القوة = الشحنة × السرعة × المجال المغنطيسي × جيب الزاوية

حيث اتجاه تلك القوة عمودي على كل من السرعة والمجال المغنطيسي ويتبع قاعدة اليد اليمنى.

تحقق من فهمك - الإجابات

١-١١ المغنطيسات المنزلية

١. لا زال السطح العلوي لكل من النصفين قطبين شماليين، ولا زال السطح السفلي لكليهما قطبين جنوبيين. يتنافر القطبان العلويان، وكذلك القطبان السفليان.

لماذا: هذه الظاهرة المحيّرة، حيث المغنطيس الدائم المنقسم يُعارض محاولات إعادة تركيبه، هي توضيح للطاقة الكامنة المحتواة في المغنطيس الدائم. المغنطيس هو مجموعة من العديد من المغنطيسات الصغيرة جدا، جميعها مصطفة بأقطابها الشمالية مع بعضها وأقطابها الجنوبية مع بعضها. الأقطاب المتشابهة تتنافر، فمن الصعوبة الإمساك بالمغنطيسات الصغيرة جدا بعضها ببعض. إذا أُعطي المغنطيس فرصة فإنه سيدفع أجزاءه بعيدا عن بعضها البعض. تطلق المغنطيسات الدائمة القوية كثيراً من الطاقة الكامنة عندما تنكسر بحيث تكاد تنفجر عندما تتصدع.

٢. سيكون له قطب شمالي.

لماذا: سيصبح المشبك مستقطباً مغنطيسيا بوجود قطبه الجنوبي بالقرب من القطب الشمالي للمغنطيس الدائم. سيكون للطرف الآخر لمشبك الورق قطب شمالي وسيكون قادرا على استقطاب مشابك أخرى. تجذب هذه المشابك المستقطبة بعضها البعض بقوة تكفي لاتصالها مع بعضها البعض في سلسلة طويلة.

٣. ستتبدل أقطابه المغنطيسية.

لماذا: بالرغم من أن المغنطيس الصغير لا يستطيع أن يتحرك، إلا أن أقطابه تستطيع. عندما يصبح التنافر بين القطبين الشماليين قويا بما فيه الكفاية، فإن أقطاب المغنطيس الصغير ستتبدل وعند ذلك سيقدم قطبه الجنوبي لقطب المغنطيس الكبير الشمالي. ستكون بذلك قد عكست أقطاب المغنطيس الصغير بشكل دائم.

٤. ستواجه الإبرة قوة باتجاه المجال المغنطيسي الضعيف (بعيدا عن المغنطيس الزري).

لماذا: باصطفاف الأقطاب المغنطيسية للإبرة عكسيا مع مجال المغنطيس الزري، فإن إبرة البوصلة ستواجه قوة نحو المجال المغنطيسي الأضعف. حقيقة، إذا استمْررت في دفع البوصلة قريبا من المغنطيس الزري، فإنه يمكنك أن تعيد مغنطة تلك الإبرة بغير قصد؛ سوف تتبدل أقطابها بشكل دائم وبالتالي ستشير للجنوب بدلا من الشمال! لكن لا تقلق، لأنك يمكنك ببساطة إعادة هذه العملية لإرجاع البوصلة لوضعها الطبيعي.

٥. الأقطاب عند أطراف الجسور.

لماذا: تتبع برادة الحديد خطوط الفيض المغنطيسي، والتي تمتد من الأقطاب الشمالية إلى الأقطاب الجنوبية. لذا فإن أحد طرفي كل جسر هو قطب شمالي والطرف الآخر هو قطب جنوبي.

٦. يتكوّن المجال المغنطيسي بواسطة التيار في ملف سلكي.

لماذا: يتطلب تصوير الرنين المغنطيسي مجالا مغنطيسيا شديداً ومنتظماً ومتسعاً بما يكفي أن يحتوي المريض داخله. الطريقة المثلى لإنشاء مثل هذا المجال الضخم هي باستخدام ملف حامل للتيار. في الواقع، المجال ضخم جدا بحيث تمتد خطوط فيضه بعيدا عن المغنطيس ويمكنها أن تجذب الأجسام الحديدية أو الفولاذية من عبر الغرفة. يمكن استنتاج أن المواد المغنطيسية محظورة بالقرب من مغنطيس الـ MRI.

١١-٢ توزيع القدرة الكهربائية

١. ستتضاعف القدرة تقريباً.

لماذا: مضاعفة طول السلك هي مثل وضع سلكين متماثلين واحدا بعد الآخر. إذا استخدم كل سلك وحدة واحدة من القدرة، فإن السلكين سيستخدمان وحدتين تقريباً من القدرة. المقاومة الكهربائية تتناسب طردياً مع طول السلك وعكسيا مع مساحة مقطع ذلك السلك. تقصير وتسميك السلك يقلل من مقاومته.

٢. نعم، عند لحظة انعكاس الفولطيات.

لماذا: في حين يكون السلك الأرضي والسلك المحايد في المقبس الكهربائي في العادة عديم الشحنة وبالتالي آمناً نسبيا، إلا أن السلك الحيّ هو في العادة مشحون وخطر. تتردد فولطية ذلك السلك الحيّ بسرعة بين فولطية موجبة عالية وفولطية سالبة عالية. فقط عندما تمر الفولطية خلال ٠V يمكنك أن تلمسها دون أن تخاطر بالإصابة بصدمة. ولكن هذه اللحظة الآمنة قصيرة جدا بحيث لا يمكنك واقعيا أن تتجنب حدوث صدمة. لا تجرّب ذلك!

٣. أنتج المغنطيس المتحرك مجالا كهربائيا، والذي دفع الشحنات المتحركة خلال ذلك الملف السلكي.

لماذا: يؤثر المغنطيس الصغير المتذبذب على تيار الملف من خلال الحثّ المغنطيسي.

٤. يحث المغنطيس الساقط تيارات ومغنطيسية على السطح. وفقا لقانون لنز، هذه المغنطيسية المستحثة تعارض التغيّر الذي أحدثها: فهي تعمل على تبطئة المغنطيس الهابط.

لماذا: يحث المغنطيس القويّ على مثل هذه المعارضة المغنطيسية القوية في موصل جيّد مما يجعل من الصعب تحريك المغنطيس. يظهر هذا التأثير جلياً في الموصل الفائق، أي المادة التي توصّل الكهرباء بشكل مثالي ويمكنها أن تحافظ على التيارات المستحثة إلى الأبد. يمكن للموصل الفائق أن يبطئ المغنطيس الساقط إلى أن يوقفه تماما ويبقيه معلقا بشكل لانهائي (شكل ١١,٢,١).

٥. عندما يتدفق تيار مستمر خلال الملف الابتدائي لمحوّل، فإنه يكوّن مجالا مغنطيسيا ثابتا حول القلب الحديدي. بما أن هذا المجال لا يتغيّر، فإنه لا يكوّن أي مجالات كهربائية ولا يحثّ تيارا في الملف الثانوي للمحوّل.

لماذا: يجب أن يتغيّر التيار المار خلال الملف الابتدائي لكي يتغيّر المجال المغنطيسي في الملفات ويُحث تيار في الملف الثانوي. إن نقل القدرة من دائرة إلى أخرى مفيد جداً بحيث هناك العديد من الأجهزة العاملة بكهرباء تيار مستتمر تقوم بفتح وغلق كهربائها لكي تُحاكي التيار المتردد، لكي تستطيع أن تستخدم المحوّلات.

٦. الملف الثانوي للمحوّل له نصف عدد لفات ملفه الابتدائي.

لماذا: لخفض الفولطية، يجب أن يكون للمحوّل عدد لفات أقل في ملفه الثانوي مقارنة بملفه الابتدائي. تؤدي اللفات الأقل لقوة دافعة كهربائية أصغر في الملف الثانوي وفولطية أصغر خارجة من المحوّل.

٧. يحوّل قلبه المغنط بعضا من قدرته الكهربائية إلى قدرة حرارية. ما لم تُزال تلك القدرة الحرارية، فإن المحوّل سيسخن بشكل مفرط.

لماذا: المحوّلات ليست ذات كفاءة مثالية بالنسبة للطاقة؛ فهي تحوّل جزءاً صغيراً من القدرة الكهربائية التي تتعامل معها إلى قدرة حرارية. تساهم قوالبها المغنطيسية في تقليل تلك الكفاءة لأن محدودية ضعفها المغنطيسي وتوصيلها الكهربائي يتسببان في تسخينها. فتحات التبريد والمراوح ضرورية لإبقاء المحوّلات الكبيرة باردة.

٨. سوف تقلل من كمية الحرارة المنتجة لـ ٢٥ ٪ فقط من القيمة السابقة.

لماذا: عند 1,000,000V، سيتمكن خط النقل من حمل نفس القدرة التي يحملها خط نقل ذو 500,000V بنصف التيار فقط. بما أن القدرة المهدرة من قبل خط النقل ذاته تتناسب مع مربع التيار، فإن تنصيف التيار يقلل من القدرة المهدرة إلى ٢٥ ٪.

١١-٣ المولّدات والمحرّكات الكهربائية

١. يجب أن يقلل مقاومة فتيلة التسخين.

لماذا: بتقليل مقاومة فتيلة التسخين، فإن الدراجة تزيد من التيار المتدفق خلال الدائرة. هذا التيار المزاد يحمل قدرة أكبر من المولّد إلى الفتيلة، لذا يستخلص المولّد المزيد من الشغل الميكانيكي من راكب الدراجة.

٢. يمكنه أن يُضعّف المجال المغنطيسي للدوّار أو يقلل من عدد اللفات في ملفه.
لماذا: بما أن المولّد لا يستطيع أن يُبطئ دوّاره دون أن يقلل تردده أيضاً، فإنه يمكنه أن يقلل من قوته الدافعة الكهربائية المستحثة فقط بإضعاف المجال المغنطيسي المتردد في ملفه أو باستخدام ملف له لفّات أقل.

٣. بما أن محرك التيار المتردد التزامني يدور بالتزامن مع التيار المتردد، فإن أي زيادة أو نقصان في تردد التيار سيجعل الساعة تتحرك بسرعة أو ببطء، على التوالي.
لماذا: الساعة المستندة على محرك تيار متردد تزامني هي فقط دقيقة بدقة تردد كهربائها المترددة. عند إيصالها بمولّد كهرباء الطوارئ، بتردده غير المنتظم، فإن الساعة لن تحافظ على دقة الوقت.

٤. سوف يستقر الدوّار بسرعة ويصل لحالة اتزان مستقر ولن يدور أبدا بعد ذلك.
لماذا: بدون وجود نظام فعّال يُبطل حالة الاتزان المستقر كلما يصل إليها الدوّار، فإن المحرك لن يستمر في الدوران. أفضل ما يستطيع القيام به هو التحرك لفترة وجيزة إلى أن يبطئ الاحتكاك من حركته ويستقر في نهاية الأمر في وضع اتزان مستقر ويتوقف كلية.

٥. أثناء الضغط على المكابح، فإن العجلات تبذل شغلا على المحرّك، حيث تدفع القوة الدافعة الكهربائية المستحثة الناتجة تيارا عكسيا خلال البطارية وتعيد شحنها.
لماذا: صُمّم محرك تيار مستمر للسيارة الهجينة لكي يعمل كمولّد جيّد أيضا. عندما تحتاج السيارة أن تتسارع إلى الأمام، فإنها تسحب قدرة من بطاريتها لتدفع نفسها إلى الأمام. لكن عندما تحتاج أن تتوقف، فإنها تسحب قدرة من حركتها لتعيد شحن بطاريتها. بالطبع، يعمل محرك السيارة أيضا على تحريك العجلات وتوليد قدرة كهربائية.

٦. إن المحرك العام عديم الحساسية لاتجاه التيار لأنه لا يحتوي على مغنطيسات دائمة. عندما تعكس جميع الأقطاب المغنطيسية في المحرك، فإن القوى بين هذه الأقطاب لا تتغيّر.
لماذا: بدون وجود أي مغنطيسات دائمة في المحرك العام فإنه لا يوجد لديه أي مرجع يمكّنه من التمييز بين القطب الشمالي والقطب الجنوبي. عندما تعكس التيار المار خلال المحرك، فإن جميع أقطابه تنقلب لكنه لا يستطيع أن يستبين هذا الانعكاس. فيستمر المحرك في دورانه كما كان.

٧. قوة لورنتز.
لماذا: تواجه الشحنات المتحركة في تيار الملف قوة لورنتز حينما تسير خلال المجال المغنطيسي. تنتقل هذه القوة إلى الملف السلكي، المتصل بسطح قابل للحركة. يتحرك ذلك السطح ذهابا وإيابا حينما يتذبذب التيار وينتج صوتا. من الواضح أن السمّاعات هي تطبيق عملي وأنيق لقوة لورنتز في الحياة اليومية.

دقق في أرقامك - الإجابات

١١-١ المغنطيسات المنزلية

١. تقريبا 1000N (225lbs) في اتجاه المجال.
لماذا: وفقا للمعادلة (٢،١،١١)، القوة المبذولة على القطب الشمالي لمفتاح البراغي تساوي حاصل ضرب مقدار قطبه 1000A·m بمقدار المجال المغنطيسي 1T. بما أن 1T = 1N/A·m، فإن حاصل الضرب هو 1000N ويشير في اتجاه المجال. مثل هذه القوى الكبيرة ليست بالشيء الغريب عندما يُعرّض الحديد أو الفولاذ لمجال مغنطيسي قويّ، فكن على حذر عند العمل بالقرب من المغنطيسات الكبيرة!

١١-٢ توزيع القدرة الكهربائية

١. حوالي 640,000J.
لماذا: بما أن 1T تكافئ 1N/A·m، فإن المعادلة (٢،٢،١١) تُعطينا طاقة مجال مقداره 4T الذي يشغل حيّز 0.1 m3 كالتالي:

$$\text{الطاقة} = \frac{0.1\ \text{m}^3 \times (4\ \text{N/A.m})^2}{2\ .(4\pi\ \text{x}10^{-7}\ \text{N/A}^2\ )} = 460{,}000\text{N.m} = 460{,}000\text{J}$$

١١-٣ المولّدات والمحركات الكهربائية

١. 2N
لماذا: كما تشير المعادلة (١،٣،١١)، فإن قوة لورنتز تتناسب مع سرعة الشحنة. بمضاعفة التيار في الملف ستتضاعف سرعات شحناته المتحركة وستواجه ضعف قوة لورنتز.

تمارين

١. هل من الممكن أن يوجد مغنطيسان دائمان يجذبان بعضهما دائما بغض النظر عن توجيههما النسبي؟ فسّر ذلك.

٢. تقل القوى المغنوستاتيكية بين مغنطيسين زريين بسرعة مدهشة حينما تزيد المسافة الفاصلة بينهما. استخدم قانون كولوم للمغنطيسية وخاصية الثنائية القطبية لكل مغنطيس زري لتفسير هذا التأثير.

٣. إذا أحضرت بوصلتين مغنطيسيتين بالقرب من بعضهما، فإنهما ستبدآن بجذب بعضهما البعض. لماذا لا تتنافران؟

٤. إذا أحضرت مغنطيساً زرياً بالقرب من أنبوب حديدي، سوف يبدآن بجذب

بعضهما البعض. لماذا لا يتنافران؟

٥. إذا أمسكت مغنطيساً دائماً بالطريقة الخاطئة في مجال مغنطيسي قويّ جدا، فإن مغنطيسيته ستنعكس بشكل دائم. ماذا يحدث للنطاقات المغنطيسية داخل المغنطيس الدائم أثناء هذه العملية؟

٦. إن طرق أو تسخين مغنطيس دائم يمكن أن يزيل مغنطيسيته. ماذا يحدث للنطاقات المغنطيسية داخله أثناء هذه العمليات؟

٧. إذا وضعت مغنطيساً زرياً في مجال مغنطيسي منتظم، ما هي محصلة القوة على ذلك المغنطيس الزرّي؟

٨. إذا مسكت بوصلة مغنطيسية في مجال مغنطيسي منتظم يشير نحو الشمال، ففي أي اتجاه، إن وجد، تشير محصلة القوة على البوصلة؟

٩. هل خطوط الفيض المغنطيسي أكثر عندما تبدأ أو تنتهي عند مغنطيس زرّي، أم أن هذين العددين متساويان؟

١٠. قارن بين عدد خطوط الفيض المغنطيسي التي تبدأ والتي تنتهي على شريط بلاستيكي مغنطيسي. فسر ذلك.

١١. يختلف شريطان مغنطيسيان بلاستيكيان فقط بعدد الأقطاب التي يمتلكانها لكل سنتيمتر. أحدهما له 2 قطب/سنتيمتر والآخر له 4 قطب/سنتيمتر. من أي الشريطين تمتد خطوط الفيض المغنطيسي للخارج أكثر؟

١٢. أي الشريطين المغنطيسين البلاستيكين في تمرين ١١ ينجذب باتجاه ثلاجة على بعد مسافة أكبر؟

١٣. كيف يمكنك استخدام الحديد لكي تمنع خطوط الفيض المغنطيسي من مغنطيس زري قوّي من الامتداد خارجيا إلى الغرفة؟

١٤. لمنع المغنطيسات القوية في مرفق علمي في الغرفة المجاورة من إرسال خطوط فيض خلال مكتبك، هل يجب عليك أن تبطن جدران المكتب بالألومنيوم أم بالحديد؟

١٥. يركّب أصدقاؤك حجرة علوية في غرفتهم ويستخدمون أسلاك سماعات رفيعة لتوفير الكهرباء لمقبس إضافي. إذا سحبوا مقداراً صغيراً فقط من التيار من المقبس، فإن الهبوط الفولطي في كل سلك سيظل صغيرا. لماذا؟

١٦. عندما يصل أصدقاؤك من التمرين 15 نظاماً سمعياً كبيراً في المقبس، فإنه لا يعمل بشكل جيّد لأن الارتفاع الفولطي الذي يوفره المقبس الإضافي هو فقط 60 V. توفر شركة الكهرباء ارتفاعاً فولطياً مقداره 120V، فأين الفولطية المفقودة؟

١٧. صُمم مصباح ضوئي معيّن ليستهلك 40W عندما يعمل ببطارية سيارة ذات تيار مستمر 12V. إذا وفّرت لذلك المصباح كهرباء تيار متردد 12V من محوّل، فما مقدار القدرة التي سيستهلكها؟

١٨. تستهلك حمّاسة الخبر الخاصة بك 800W عندما تعمل على قدرة كهربائية لتيار متردد مقدارها 120V. إذا كان فريقك في لعبة الرغبي في مخيّم وجميعكم وصلتم بطاريات الكشافات الضوئية سوية لكي توفروا لتلك الحمّاسة قدرة كهربائية لتيار مستمر 120V ، فما مقدار القدرة التي ستستهلكها؟

١٩. لقراءة الشريط الممغنط على بطاقة هوية أو بطاقة ائتمانية، يجب عليك أن تسحبها بسرعة عبر ملف سلكي صغير. لماذا يجب أن تتحرك البطاقة لكي يتمكن النظام الملفي من قراءتها؟

٢٠. أحد أنواع الميكروفونات له مغنطيس دائم وملف سلكي يتحركان بالنسبة لبعضهما البعض استجابة للموجات الصوتية. لماذا يكون التيار في الملف مرتبطاً بالحركة؟

٢١. إذا كان للملف الابتدائي في محوّل 200 لفة وتم تزويده بكهرباء تيار متردد 120V ، فكم عدد اللفات التي يجب أن تكون في الملف الثانوي ليوفّر كهرباء تيار متردد 12V ؟

٢٢. المحول الذي يمد تمثالاً فنياً مضيئاً بالكهرباء يوفّر تيار متردد 9600V عندما يُعطى كهرباء تيار متردد 120V. إذا كانت هناك 100 لفة في ملف المحوّل الابتدائي، فكم عدد اللفات في الملف الثانوي؟

٢٣. يلتف الملف الابتدائي في محوّل 240 لفة حول القلب الحديدي، والملف الثانوي لذلك المحوّل يلتف 80 لفة. إذا كانت الفولطية الابتدائية لتيار متردد 120V ، فما هي الفولطية الثانوية؟

٢٤. المحوّل في مضخم استريو له ملف ابتدائي ذو 200 لفة وملف ثانوي ذو 40 لفة. عندما توفّر كهرباء تيار متردد 120V للملف الابتدائي، فما هي الفولطية التي يوفرها الملف الثانوي؟

٢٥. إذا مرّ تيار متوسط مقداره 3A خلال الملف الابتدائي للمحوّل المذكور في تمرين ٢٣، فما هو متوسط التيار المار خلال الملف الثانوي لذلك المحوّل؟

٢٦. إذا كان متوسط التيار المار خلال الملف الثانوي للمحوّل المذكور في تمرين ٢٤ هو 10A، فما هو متوسط التيار المار خلال الملف الابتدائي؟

٢٧. يتذبذب مغنطيس معلق بزنبرك داخل وخارج حلقة معدنية. بالرغم من أنه لا يلامس الحلقة، إلا أن تذبذب المغنطيس يتضاءل أسرع مما لو لم تكن هناك حلقة. فسّر ذلك.

٢٨. الشرارة ذات الفولطية العالية والتي تُشعل الغازولين في محرك جزازة العشب تنتج عندما يتحرك قطب مغنطيسي فجأة مارا بملف سلكي. من أين تأتي طاقة تلك الشرارة؟

٢٩. إذا كان لديك ملف سلكي، وبطارية، وبوصلة مغنطيسية، ومفتاح كهربائي، فكيف يمكنك أن تجعل إبرة البوصلة تدور؟

٣٠. إذا أدرت مغنطيساً دائماً حول بوصلة مغنطيسية، فإن إبرة البوصلة ستتبعه. ما الذي يوفّر للإبرة الطاقة التي تحتاجها لتستمر في الدوران بالرغم من الاحتكاك في نقطة ارتكازها؟

٣١. لا يمكنك أن تصنع محركا باستخدام مغنطيسات دائمة فقط. لم لا؟

٣٢. لا يمكنك أن تصنع محركا باستخدام تيار مستمر ومغنطيسات كهربائية لا

تتطلب مفاتيح. لم لا؟

٣٣. إذا ضاعفت فولطية التيار المستمر المتوفرة لمحرك تيار مستمر، ماذا سيحدث؟

٣٤. إذا ضاعفت فولطية التيار المتردد المتوفرة لمحرك تيار متردد تزامني ، ماذا سيحدث؟

٣٥. إذا وفرت فولطية تيار متردد لمحرك تيار مستمر ذي فرشاة، ماذا سيحدث؟

٣٦. إذا وفرت فولطية تيار مستمر لمحرك تيار متردد تزامني ، ماذا سيحدث؟

٣٧. بعض مصابيح الزينة لها فتيلة على شكل حلقة تتذبذب ذهابا وإيابا بالقرب من مغنطيس دائم صغير. سلك الفتيلة ليس ممغنطاً بذاته، فلماذا تتحرك الفتيلة عندما يتدفق تيار متردد خلالها؟

٣٨. إذا مرّ سلك مرن يحمل تيارا مترددا بتردد 60Hz خلال الفجوة التي بين قطبين مغنطيسين شمالي وجنوبي، ماذا سيحدث لذلك السلك؟

٣٩. افرض أنك ضمّنت ملفاً حثّياً في دائرة كهربائية تشمل بطارية، ومفتاحاً، ومصباحاً ضوئياً. التيار المغادر لطرف البطارية الموجب يجب أن يتدفق خلال المفتاح والملف الحثّي والمصباح الضوئي قبل أن يعود لطرف البطارية السالب. يتزايد التيار في هذه الدائرة ببطء عندما تغلق المفتاح، ويستغرق المصباح الضوئي بضع ثوانٍ لكي يصبح متوهجا. لماذا؟

٤٠. عندما تفتح مفتاح الدائرة المذكورة في تمرين ٣٩، فإن شرارة تظهر بين طرفيها. نتيجة لذلك، فإن الدائرة ذاتها لا تُفتح بالكامل لحوالي نصف ثانية، والذي أثناءه يصبح المصباح خافتا تدريجيا. يشير سلوك المصباح أن التيار في الدائرة يتضاءل تدريجيا، بدلا من التوقف فجأة عندما تفتح المفتاح. لماذا يتضاءل التيار ببطء؟

٤١. ينتج أنبوب الصورة التلفزيونية صوره باستخدام حزم من الإلكترونات تتحرك خلال الفراغ وتصطدم بالفسفور على السطح الداخلي للشاشة. تشع هذه الفسفورات بعد الاصطدام. ولكن توجيه حزم الإلكترونات مهمة دقيقة. لماذا من المهم تجنب وضع مغنطيسات قوية بالقرب من أنبوب الصورة التلفزيوني؟

٤٢. تنتج السمّاعات الصوتية حركة وفي نهاية الأمر صوتا بتمرير تيارات متذبذبة خلال أسلاك مغمورة في مجالات مغنطيسية. لماذا ينتج هذا الترتيب حركة ولماذا من المهم عدم وضع السمّاعات الصوتية بالقرب من أنبوب الصورة التلفزيونية (تمرين ٤١)؟

مسائل

١. إذا وضع قطب مغنطيسي مقداره 0.1A·m في مجال مغنطيسي يشير للأعلى مقداره 1 T، ما هي القوة التي سيواجهها ذلك القطب؟

٢. ما هي القوة المؤثرة على قطب مغنطيسي مقداره 2.0A·m- موضوع في مجال مغنطيسي يشير إلى الأمام ومقداره 0.2T؟

٣. إذا واجه قطب مغنطيسي مقداره 1.0A·m- قوة مقدارها 1N وتشير للأسفل، فما هو المجال المغنطيسي المحلي؟

٤. تُبذل قوة مقدارها 0.01N باتجاه اليمين على قطب مغنطيسي مقداره 5.0A·m . ما هو المجال المغنطيسي المغمور فيه القطب؟

٥. يواجه قطب مغنطيسي مغمور في مجال مغنطيسي مقداره 1.0T ويشير للأعلى قوة للأعلى مقدارها 0.1N. ما هو ذلك القطب المغنطيسي؟

٦. يواجه قطب مغنطيسي مغمور في مجال مغنطيسي مقداره 0.1T ومشيراً للأعلى قوة مقدارها 0.1N باتجاه الأسفل. ما هو ذلك القطب المغنطيسي؟

٧. المجال المغنطيسي للأرض هو تقريبا 0.000050T. ما هي الطاقة في حجم $1m^3$ من ذلك المجال؟

٨. المغنطيس في وحدة MRI كبيرة قد يكون له مجال مغنطيسي مقداره 1.0T ويشغل حيّز $1m^3$. ما مقدار طاقة المجال المغنطيسي الموجودة في ذلك الحجم؟

٩. ما هو الحجم الذي يحوي 1.0J من الطاقة في المجال المغنطيسي ذي 1T المذكور في مسألة رقم ٨؟

١٠. المجال المغنطيسي ذو 0.05T هو اعتيادي بالقرب من المغنطيسات المنزلية. ما هو الحجم من ذلك المجال المغنطيسي الذي يحوي طاقة مقدارها 1J؟

١١. ما هو المجال المغنطيسي اللازم لـ $1m^3$ من ذلك المجال لكي يحتوي على 1.0 J من الطاقة؟

١٢. ما هو المجال المغنطيسي اللازم لـ $1m^3$ من ذلك المجال لكي يحتوي على 10J من الطاقة؟

الفصل ١٢

الالكترونيات

يمكن للتيارات الكهربائية والمعادن الممغنطة أن تقوم بأكثر من مجرد إضاءة المصابيح الضوئية أو إلصاق أوراق على الثلاجات. بل يمكنها أيضا أن تقدم أشياء مختلفة، من الأصوات إلى الصور المتحركة إلى المعلومات الحاسوبية. علاوة على ذلك، يمكن استخدامها في معالجة تلك المعلومات بطريقة مدهشة وبسرعات مذهلة. في هذا الفصل، سوف نرى كيف أن الكهرباء والمغنطيسية تسببت في نشوء حقل الإلكترونيات.

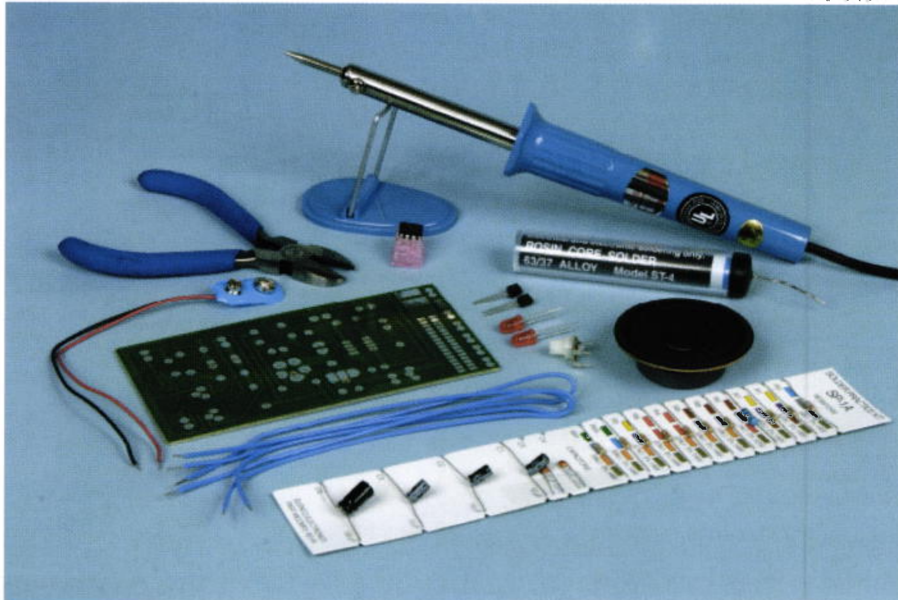
الأجهزة الإلكترونية هي أدوات تستخدم التيارات الكهربائية للقيام بمهام معقدة. ظهرت الإلكترونيات أول الأمر في بداية القرن العشرين مع تطور الصمامات المفرغة وقد استمرت في التطور منذ ذلك الزمن. كثيراً ما تبعت التطورات في الإلكترونيات التطورات في الفيزياء الكمية وفيزياء الجوامد، فلم يكن من المدهش أن الأبحاث في أشباه الموصلات قادت لتصميم إلكترونيات مثيرة. ولكن اختراع الترانزيستور شبه الموصّل بعد الحرب العالمية الثانية بقليل أحدث ثورة عظيمة في الإلكترونيات لم تكن متوقعة. بتطوير الأجهزة الإلكترونية من قبل الفيزيائيين والمهندسين، أصبحت تدريجيا غير باهظة الثمن وفعّالة جدا حتى أنها الآن تتخلل جميع أوجه المجتمع الحديث.

تجربة: بناء طقم أدوات إلكترونية

لقد قمت باستخدام أجهزة إلكترونية طوال حياتك، ومن غير المحتمل أن مجرد زيادة استخدامها سيضيف لبصيرتك شيئاً. لتلمس كيفية عمل الأجهزة الإلكترونية، سيكون من الأفضل أن تبني أحدها!

هناك العديد من أطقم الأدوات البسيطة موجودة على الإنترنت، وبسهولة يمكن إيجادها بالبحث عن «electronic kits» أو «solder practice kits». التلحيم هو تقنية لتوصيل المكونات الإلكترونية بمعدن رخو ينصهر بسهولة عند تسخينه بواسطة كاوية لحام. كما تتوفر أطقم تجارب تركيبية، لكنها أغلى ثمناً وليست مثل الأجهزة الإلكترونية الحقيقية.

بإذن لو بلومفيلد



ابحث عن طقم أدوات يحتوي على مكونات إلكترونية أساسية: مقاومات، ومكثفات، وصمامات ثنائية (دايود)، وترانزيستورات واحصل على أو استعر كاوية لحام وبعضاً من قصدير اللحام. إذا كنت مقتدراً ماليا، اشترِ مقياساً إلكترونياً بسيطاً متعدد الأقراص (مُلتيمتر multimeter) لفحص سلوك طقم أدواتك. حتى بعد أن تنتهي من طقم الأدوات، لن تنتهي فائدة المُلتيمتر. يُعد الملتيمتر للكهربائي أو الفني الإلكتروني ما يُعد المسطرة والزاوية والميزان للنجّار أو المسّاح.

ابحث عن مكان عمل آمن ومُضيء بشكل جيّد واقرأ تعليمات الطقم بعناية قبل أن تبدأ. سوف تُدخل نهايات الأسلاك أو «أطراف» المكونات الإلكترونية المتعددة في ثقوب في لوحة إلكترونية مطبوعة – لوح عازل يحمل أشرطة معدنية مطبوعة عليه كصورة. تصل هذه الأشرطة بين مكونات الطقم، بالرغم من أنه يجب أيضا أن تُكمل هذه التوصيلات باستخدام القصدير وكاوية اللحام. احذر أن تحرق نفسك حينما تُذيب القصدير في موضعه. تأكد من أن القصدير يبلل كل الأسطح المعدنية – أي ينتشر للخارج مثل الماء على منديل ورقي بدلا من أن يتخرّز مثل الماء على الورق الشمعي.

بينما تُركّب طقمك، لاحظ الفروق بين المكونات. بعض من المكونات يجب أن تُدخل بالاتجاه الصحيح. لماذا؟ في الغالب هذه المكونات الاتجاهية حسّاسة للحرارة ويجب أن لا تُسخّن لمدة طويلة بكاوية اللحام. ما الذي يمكن أن تُحدثه درجات الحرارة المرتفعة على هذه المكونات؟

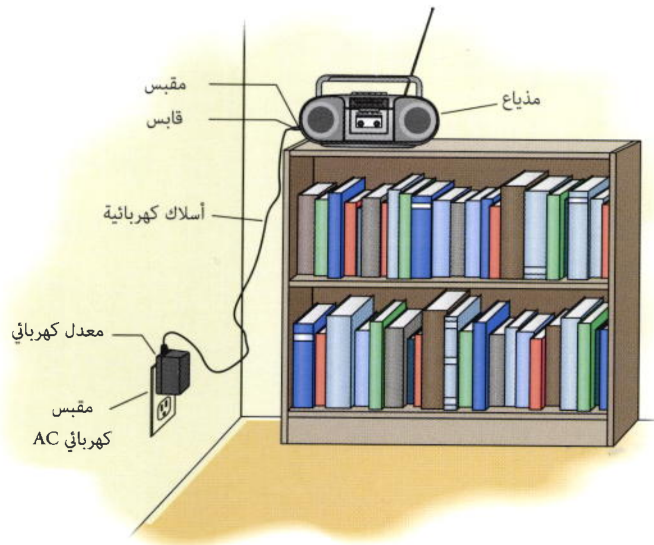
حينما تبني جهازك، حاول أن تتنبأ كيف سيتدفق التيار خلال مكوناته المتعددة وماذا ستكون الفولطيات عند نقاط مختلفة في الجهاز. كيف يمكن أن تتغير هذه التيارات والفولطيات مع الزمن؟ من التعليمات ومن حدسك، حاول أن تُحدد الدور الذي يلعبه كل مكوّن في الجهاز ككل.

عندما يكتمل الطقم، شغّله ولاحظ كيف يعمل (على أمل أن يعمل). إذا كان لديك مُلتيمتر، اختر «فولطية DC» وقس الفولطية عند نقاط متعددة في الجهاز. للقيام بذلك، يجب أن تُعطي الملتيمتر مرجعاً قيمته 0 V عن طريق وصل سلكه الأسود بطرف البطارية السالب وبعد ذلك تُلامس سلك الملتيمتر الأحمر بالبقعة التي تريد أن تقيس عندها الفولطية. هل تحققت من تنبئك؟

دليل الفصل

لفهم الخصائص الرائعة للأجهزة الإلكترونية، سوف نفحص اثنتين منهم: (١) المعدّلات الكهربائية و(٢) المشغّلات الصوتية. في قسم المعدلات الكهربائية، سوف ننظر في كيفية استخدام هذه الأجهزة البسيطة للكهرباء التي تحصل عليها من تيار المقابس الكهربائية المتردد ذي الفولطية العالية نسبيا لتوفر تيارا مستمرا ذا فولطية منخفضة نسبيا والمطلوب لمعظم الأجهزة الإلكترونية. وسنرى في قسم المشغلات الصوتية كيف تُجمع تشكيلة صغيرة من المكونات الإلكترونية الأساسية لبناء كمبيوتر ومضخم صوتي، وكيف تم دمج هذين الجهازين مع بعضهما في وحدة واحدة لكي تستطيع الاستماع لآلاف من الأغاني بينما تسترخي على شاطئ البحر. ولمزيد من المعلومات الأولية، اقلب الصفحات لتصل إلى ملخص الفصل في صفحة ٤١١.

في حين لا يستطيع هذا المسح الوجيز أن يشمل جميع المواضيع الأساسية في الإلكترونيات، إلا أنه يُعطي أساسا جيدا يمكن البناء عليه. بمجرد أن تفهم كيفية عمل بعض المكونات الإلكترونية المهمة، لن يكون من الصعب رؤية كيف يمكن دمجها بطرق لم يتخيلها أحد. إن المكونات الإلكترونية مثل مكعبات البناء التي تتحكم في حركة الجسيمات المشحونة ويمكنك تجميعها سوية لجعلها تقوم بكل شيء تقريباً.



١٢-١ المعدّلات الكهربائية

إن كل جهاز إلكتروني تشتريه تقريباً يأتي معه معدّله الكهربائي الخاص به، وهو مكعب أسود صغير إما أن يوصل مباشرة بالمقبس الكهربائي أو له سلك موصّل. تحصل هذه المعدّلات على الكهرباء من شبكة الكهرباء القديمة وتُهيئها للأجهزة الحديثة. تتراوح المعدّلات الكهربائية بشكل واسع بالنسبة للفولطيات والتيارات التي توفرها، ودرجة سلاسة وانتظام فولطياتها، وحتى الموصلات التي توفر كهرباءها من خلالها. والنتيجة هي العشرات من المعدّلات التي في النادر تكون قابلة للتبدّل، ووفقا لقانون ميرفي، فإن المعدّل الذي تحتاجه هو دائما الذي سقط خلف أرفف الكتب.

لكن بالرغم من اختلافاتها، فإن هذه المعدّلات الكهربائية تقوم جميعها بنفس المهمة الجوهرية: تأخذ تياراً متردداً ذا فولطية عالية نسبيا وتستخدم قدرته لإعداد تيار مستمر ذي فولطية منخفضة. تقوم المعدّلات بهذا التحويل بكفاءة، وبشكل رخيص، وبدرجة عالية من الجودة . في هذا القسم، سوف نرى كيف يمكن للمعدّلات الكهربائية البسيطة أن تقوم بهذا التحويل.

أسئلة للتفكير

لماذا لا تستطيع معظم الأجهزة الإلكترونية أن تعمل بتيار متردد؟ لماذا تحتاج هذه الأجهزة تيارا مستمرا متوفراً بفولطية محددة؟ ما هي العلاقة بين البطاريات التي يستخدمها جهاز وفولطية معدّله الكهربائي؟ عندما تصل فولطية وتيار مقبس كهربائي إلى الصفر أثناء انعكاس تياره المتردد، ما الذي يمكن أن يحدث لنتاج المعدّل الكهربائي الموصل بالمقبس؟ ما الذي يمكن أن يقوم به المعدّل لتحمّل ذلك الانعكاس؟

تجارب يمكن القيام بها

ما لم تقطن في الغابات، فإنه من المحتمل أن لديك العديد من المعدلات الكهربائية في أدراجك أو تحت سريرك. ألقِ نظرة على تلك المعدّلات. أبسط الأنواع ستكون على شكل مكعبات توصل مباشرة بالمقبس الكهربائي. افحصها لترى أن كل واحد منها يوفّر فولطية لتيار مستمر محددة بمقدار تيار قصوي. علاوة على ذلك، كل منها يتوقع مدى ضيّقاً من الفولطيات الداخلة، مثل تيار متردد بفولطية *120V* في الولايات المتحدة الأمريكية أو تيار متردد بفولطية *230V* في أوربا. ماذا سيحدث لو وصلّت أحد هذه المعدّلات في المقبس الكهربائي الخاطئ؟ [تحذير: لا تجرّب ذلك! معدل تيار متردد *120V* سيتلف ويتلف الجهاز الموصّل به عند وصله بمقبس تيار متردد *230V* ، بينما معدل تيار متردد *230V* لن يتلف لكنه سيخفق في تشغيل جهازه بشكل جيّد.]

في الغالب تكون المعدّلات الشبيهة بالطوب والتي لها أسلاك توصيل أكثر تعقيدا من المعدلات الشبيهة بالمكعبات والتي توصل بالمقبس مباشرة. بصفة عامة، هذه المعدلات الشبيهة بالطوب والمستخدمة في الكمبيوترات والأجهزة الأكثر تعقيدا تنظم فولطيتها الخارجة بعناية. علاوة على ذلك، يمكنها في العادة التعامل مع مدى أوسع من الفولطيات الداخلة، مثل تيار متردد بفولطية من $100V$ إلى $240V$. ما الذي يجعل تقبُّل مثل هذا المدى من الفولطيات الداخلة تحدياً كبيراً؟

بعض من معدّلاتك قد يكون لها مصابيح تشير عند عملها. صل هذه المعدّلات بالمقبس ثم افصلها. هل ينطفئ ضوؤها فورا؟ إذا لم ينطفئ، فلمَ لا؟

أخيرا، إذا كان لديك معدل مكعبي لم تعُد بحاجة إليه، فقم بفتحه بعناية. كن حذرا: افصله أولا من الكهرباء وتجنب قطع نفسك. ستجد بداخله محوّلاً والعديد من الأجهزة شبه الموصلة والتي تسمى بالدايود (الصمامات الثنائية). قد تجد أيضا جهاز تخزين يُسمّى مكثّفاً. يمكن لهذه المكونات سوية أن تُوفر تيار مستمر بفولطية منخفضة من تيار متردد بفولطية عالية. وهذا هو ما يدور حوله هذا القسم.

إنتاج تيار كهربائي مستمر من تيار كهربائي متردد

في حين يمكن للأجهزة الكهربائية مثل حمّاصة الخبز والمصابيح المتوهجة أن تعمل إما بتيار كهربائي متردد أو مستمر ، إلا أن معظم الأجهزة الإلكترونية تتطلب تيار كهربائي مستمر. فهناك سببان لاشتراطها. أولا: تحتوي الأجهزة الإلكترونية على مكونات إلكترونية معقدة حساسة لاتجاه تدفق التيار ولا تعمل بشكل جيّد إذا انعكس اتجاه ذلك التيار. ثانيا: في العادة تحتاج الأجهزة الإلكترونية إمداداً مستمراً من الكهرباء ولا يمكنها تحمّل اللحظات الوجيزة من انعدام الكهرباء والتي تحدث عندما ينعكس التيار المتردد.

مع تعلّق الأجهزة الإلكترونية بالتيار المستمر، فإنها تعمل بشكل رائع باستخدام البطاريات. بالطبع، يجب أن تركّب تلك البطاريات بالاتجاه الصحيح وإلا ستدفع التيار في الاتجاه الخاطئ. إذا البطاريات والإلكترونيات منسجمة مع بعضها البعض.

من المؤسف أن الطاقة المختزنة في البطاريات تنفد في نهاية الأمر ويجب استبدالها أو إعادة شحنها. وبعض الأجهزة الإلكترونية شديدة التعطّش للكهرباء مما يجعل تشغيلها بالبطاريات يكلف ثمنا باهظا. فما لم تكن وريثاً أو قريباً لصاحب مصنع بطاريات، ستحتاج لمصدر تيار كهربائي مستمر أقل ثمنا وعملي أكثر. أي تحتاج لمعدّل كهربائي.

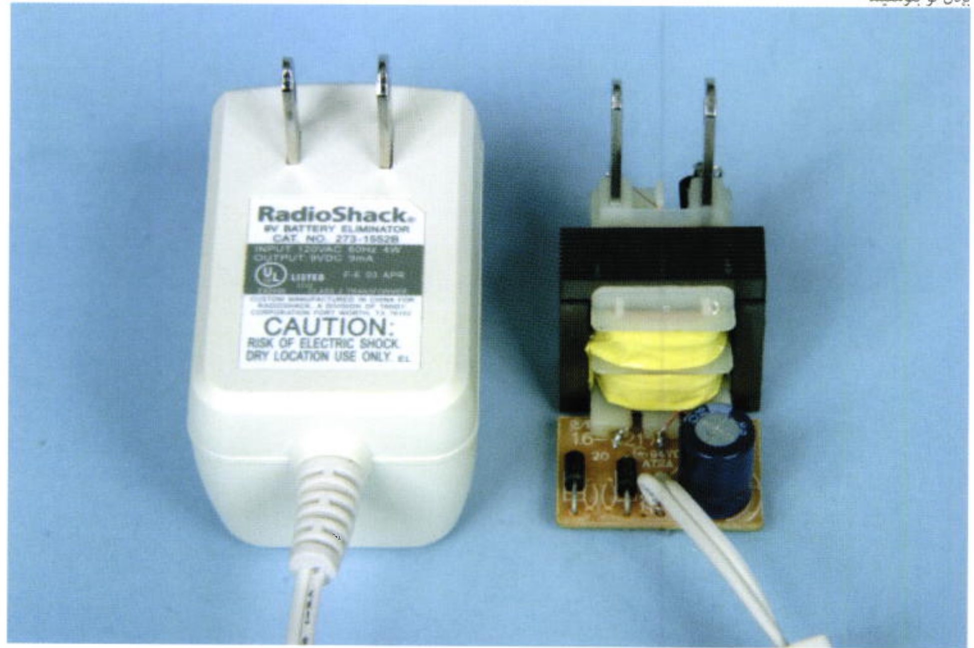
إن مهمة المعدّل الكهربائي بسيطة: فهو يستخدم تيار كهربائي متردد من المقبس الكهربائي ليوفر تيار كهربائي مستمر لجهاز إلكتروني. أكثر تحديدا، يوفر تياراً للجهاز الإلكتروني من خلال سلك كهرباء موجب ويستقبل ذلك التيار مرة أخرى من خلال سلك كهرباء سالب. ويحافظ المعدّل على ارتفاع فولطي متوسط محدد من السلك السالب إلى السلك الموجب، كما لو كان المعدّل بطارية.

يعتمد استقرار الارتفاع الفولطي للمعدّل على مواصفاته. تسمح بعض المعدّلات لارتفاعاتها الفولطية بالتذبذب مع دورة التيار المتردد بينما تستخدم معدّلات أخرى إلكترونيات معقدة لتنظيم ارتفاعاتها الفولطية بدقة. بين هذين النقيضين توجد معدّلات تستخدم إلكترونيات بسيطة تمهد معظم التذبذبات الناتجة من التيار المتردد، لكنها لا تحاول أن تنظم فولطياتها أكثر. في هذا القسم، سوف نفحص هذه المعدّلات الكهربائية المتوسطة.

لكي نكون أكثر تحديدا، سنفحص المكونات في معدّل كهربائي يُعطي تيار مستمر بفولطية 9V (شكل ١,١,١٢) والذي يعمل بتيار كهربائي مستمر بفولطية 120V ويوفّر كهرباء لمذياع اعتيادي.

يحتوي هذا المعدّل، فيما عدا الأسلاك، على بضعة مكونات فقط: محوّل، وأربعة دايود (صمامات ثنائية)، ومكثّف. ولفهم

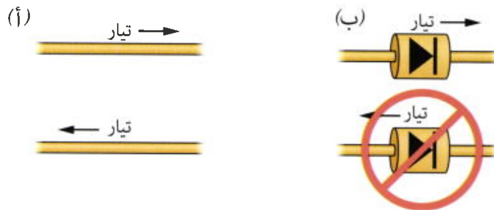
بإذن لو بلومفيلد



شكل ١,١,١٢: يستخدم هذان المعدّلان تيار كهربائي متردد 120V من مقبس كهربائي لإنتاج تيار كهربائي مستمر 9V لتوفيرها لمذياع. تم نزع الغطاء البلاستيكي من المعدّل الذي على اليمين للكشف عن محوله (أعلى) ودايودين أسودين (أسفل يسار) ومكثف اسطواني (أسفل يمين).

هذا المعدّل الكهربائي نحتاج فقط لفحص هذه المكونات وكيف تتفاعل مع بعضها. وبما أننا درسنا المحولات في قسم ١١-٢ فإننا متقدمون خطوة في هذا الفهم.

عندما تصل المحوّل بمقبس كهربائي، فإن ملفه الابتدائي يُشكّل دائرة كهربائية مع شركة الكهرباء ويتدفق تيار متردد خلالها. للملف الابتدائي 13 1/3 أضعاف لفات الملف الثانوي، فيوفّر الملف الثانوي قوة دافعة كهربائية مستحثة مترددة ذات 9V. بعدها يحوّل المعدّل التيار المتردد ذا 9V إلى تيار مستمر ذا 9V ؛ أي يُستخدم تياراً متردداً ذا 9V من المحوّل لتوفير تيار مستمر ذا 9V للمذياع. هذا التحويل الذي يبدو بسيطا سيشغلنا فيما تبقى من هذا القسم، ذلك لأنه إلى حد كبير يتضمن جهازين لم نتطرق لهما من قبل: هما الدايودات والمكثفات.



شكل ١٢,١,٢: (أ) يمكن للسلك أن يحمل التيار في أي من الاتجاهين. (ب) يستطيع الدايــود أن يحمل تيــارا فقط في الاتجاه الموضــح رمزيــا بســهم. (ج) في الرســم التخطيطي لجهاز إلكتروني، يُمثل الدايود بسهم وخط.

الدايودات هي موصلات للتيار الكهربائي في اتجاه واحد. فعلى خلاف السلك، والذي يحمل التيار بالتساوي في أي من الاتجاهين (شكل ١٢,١,٢ أ)، فإن الدايود يسمح للتيار بالتدفق خلاله في اتجاه واحد فقط (شكل ١٢,١,٢ ب). يتصرف الدايود كموصل عندما يحاول التيار أن يتدفق في الاتجاه المسموح ويتصرف كعازل عندما يحاول التيار أن يتدفق في الاتجاه الممنوع. سلوك التحويل هو ما يستخدمه المعدّل للحصول على تيار مستمر من تيار متردد.

المكثّفات هي أجهزة تُخزّن شحنات كهربائية منفصلة. وبتجميع شحنات موجبة في جانب وشحنات سالبة في الجانب الآخر، تخزّن المكثّفات كلاً من الشحنة والطاقة. يساعد هذا التخزين على استقرار الارتفاع الفولطي للمعدّل وتحمّل اللحظات التي لا يوفّر فيها التيار المتردد المنعكس أي كهرباء للمعدّل.

تحقق من فهمك #١: الأمان أولا (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

يعمل المذياع بمعدّل كهربائي موصّل مباشرة بمقبس كهربائي. ما هي النسبة من التيار المتدفق خلال المذياع والذي يتدفق أيضا خلال المقبس الكهربائي؟

موجز بسيط عن الفيزياء الكمية

بما أن الدايود حسّاس لاتجاه تدفق التيار، فلا يمكن أن يكون متناظراً. يجب أن يكون له طرفان مختلفان ومتميزان. لفهم هذين الطرفين وأوجه اختلافهما، سنحتاج لفحص المواد المصنوعة منها. أي نـحتاج لفحص أشباه الموصلات.

أشباه الموصلات هي مواد ذات خصائص تقع بين خصائص الموصلات الكهربائية وخصائص العوازل الكهربائية. في حين الشحنات متحركة دائما في الموصلات وتقريبا غير متحركة أبدا في العوازل، إلا أن الشحنات تتحرك بعض الأحيان في أشباه الموصلات. بصفة عامة، يتصرف شبه الموصل كالعازل عندما يكون باردا ونقيا وفي الظلام، ويتصرف كموصل عندما يكون ساخناً، أو غير نقي، أو مُعرّضاً للضوء. إن أشباه الموصلات هي مهمة جدا بالنسبة للدايودات ولمعظم الإلكترونيات الحديثة لدرجة أننا سنقضي الوقت في الصفحات التالية لكي نتعلم كيف تتحرك الشحنة خلالها. وسنبدأ بمناقشة الفيزياء الكمية، والتي لها تأثير عظيم على الجسيمات الصغيرة جدا التي يُبنى منها أشباه الموصلات.

بينما كشفت الفيزياء الكمية تدريجياً عن نفسها لعلماء أوائل القرن العشرين، وجد العلماء أن هذه الفيزياء مبهجة ومحيّرة في نفس الوقت. فقبل هذه الحقبة، بدا العالم الطبيعي أنه منقسم بدقة إلى جسيمات وموجات: اعتبر العلماء الإلكترون جسيماً فقط والضوء موجة فقط. ولكن من أبسط مشاهدات الفيزياء الكمية، وأكثرها علاقة بموضوعنا الحالي، هو أن كل شيء له خصائص كل من الجسيم والموجة. ببساطة، كل شيء يبدأ وينتهي كجسيم، لكن يسير كموجة.

بالنسبة للإلكترون، المفاجأة الكمية هي أنه يسير كموجة. بالنسبة للضوء، المفاجأة الكمية هي أنه ينبعث ويُمتص كجسيم. هذه المشاهدة بأن كل شيء في الطبيعة له خصائص جسيم وموجة، والتي تُسمى ثنائية الموجة-الجسيم، لم تترك مجالاً في الفيزياء دون أن تؤثر فيه. لكن في حين الفيزياء الكمية هي الآن أساس وجزء جوهري في جميع أبحاث الفيزياء الحديثة تقريباً، إلا أن تأثيرها دقيق وغالبا غير حدسي. تظهر هذه التأثيرات جليا في العالم المجهري ونراها بشكل غير مباشر. فلا عجب أنها تبدو غريبة.

سنصادف الفيزياء الكمية وتأثيراتها عدة مرات في الفصول التالية. فتظهر الفيزياء الكمية بوضوح في الخصائص الإلكترونية لأشباه الموصلات، وفي الضوء المنبعث من الذرات والليزر، وفي الاضمحلال الإشعاعي الذي يحرر الطاقة النووية. إن فحصنا لأشباه الموصلات سيعرفنا بالطبيعة الموجية للإلكترونات ويبين كيف أن الظاهرة الموجية التي درسناها في الفصل التاسع تنطبق على الفيزياء الكمية. استكشافنا للضوء من الذرات والليزر سيُعرفنا بالطبيعة الجسيمية للضوء وكيف أن تأثيرات التصادم التي درسناها في الفصل الأول والثاني والثالث تنطبق على الفيزياء الكمية. وفي فحصنا للنشاط الإشعاعي سنكشف عن تأثيرات الجسيم والموجة والتي لم نكن حتى لنتوقعها بدون الفيزياء الكمية. مع كل مصادفة سنقضم لقمة من التفاحة الكمية – وننظر كيف تُظهر التأثيرات الكمية نفسها في عالمنا اليومي.

تحقق من فهمك #٢: الذرات المتموجة (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

هل تُظهر الذرات أي خصائص موجية؟

الإلكترونات في الجوامد

تعلمنا في الفصل العاشر أن المعادن توصّل الكهرباء لأنها تحتوي على إلكترونات حرة وأن العوازل لا توصل الكهرباء لأن ليس لها إلكترونات حرة. حان الوقت الآن لننظر فيما يتحكم في حرية الإلكترونات. كما قد تُخمّن، يكمن التفسير في الفيزياء الكمية.

في عالم غير كمي، سيسير الإلكترون في جامد كجسيم فقط وسيتمكن من الحركة بأي سرعة ووفق أي مسار. لكن عالمنا

كمّي ولا يسير الإلكترون كجسيم إطلاقا؛ بل يسير كموجة. ومثل الموجات على وتر الكمان أو جلدة الطبل أو حوض ماء، فإن موجات الإلكترون في جامد لها إمكانيات محدودة.

في الفصل التاسع، لاحظنا أن أبسط الموجات الميكانيكية على جسم محدود هي جميعها موجات موقوفة - أي موجات تتذبذب فعليا في مكانها. هذا القانون ينطبق أيضا على الموجات الكميّة. تُفهم الإلكترونات في الجامد بشكل جيّد كموجات موقوفة في ذلك الجامد. تمتد كل موجة إلكترون عبر جزء من الجامد أو كله ولها نفس خصائص الموجة مثل الطول الموجي والتردد. على خلاف وتر أو جلدة طبل مهتزة، فإن الإلكترون هو موجة ثلاثية الأبعاد وتذبذبه داخلي،ولكنه مازال موجة.

هذه الصفة الموجية لها تأثيرات عظيمة على التركيب الإلكتروني للجوامد. والأكثر أهمية أنها تحدّ ما يمكن أن يقوم به الإلكترون في تلك الجوامد. رأينا في الفصل التاسع أن موجات وتر الكمان الموقوفة ذات البُعد الواحد تحتوي على النمط الأساسي فقط (شكل ٣،٢،٩) وأنماطه التوافقية (شكل ٤،٢،٩) وأن موجات جلدة الطبل الموقوفة ذات البعدين تحتوي على نمط أساسي ونغمات إضافية فقط (شكل ٩،٢،٩). بالمثل، فإن موجات الإلكترون في الجامد الموقوفة والثلاثية الأبعاد تحتوي فقط على نمط أساسي ونغمات إضافية. وفي حين هناك أنماط نغمات إضافية عديدة متوفرة، إلا أن احتمالات وجودها محدودة.

كثيراً ما تسمى الموجات الموقوفة للإلكترون في الجوامد بالمستويات - إدراكا بأن كل موجة موقوفة لها مقدار أو «مستوى» من الطاقة مرتبط بها. تسمى الموجات الموقوفة في الذرات، وهي مجموعة أخرى من الأنظمة المحدودة والتي تتواجد فيها الإلكترونات كموجات موقوفة، بالمدارات - إيماءة للطبيعة المدارية لإلكترونات الذرة. سوف نرى عندما نفحص مصابيح التفريغ في القسم ١٤-٢ أن كل الاختيارات المدارية المحدودة للذرة تُحدد ألوان الضوء التي يمكن أن تبعثها أو تمتصها. وسنرى في القسم الحالي أن المستويات المحدودة للجامد تُحدد توصيله الكهربائي.

ملاحظة أخرى رائعة في الفيزياء الكمية هي أن كل إلكترون غير مميّز يجب أن يكون له مستواه أو مداره الخاص به، أي موجته الكمية الفريدة الخاصة. هذا القانون يسمى مبدأ باولي للاستبعاد، نسبة لمكتشفه ولفغانغ باولي (انظر ١٥) . ينطبق المبدأ على صنف كامل من الجسيمات دون الذرية، جسيمات فيرمي، والذي يشمل جميع مكونات المادة الأساسية: الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. لا يمكن أبدا لجسيمين فيرميين متطابقين أن يكونا في نفس الموجة الكمية.

[١٥] اشتهر الفيزيائي النمساوي ولفغانغ باولي (١٩٠٠ - ١٩٥٨م) وعمره واحد وعشرون سنة وذلك بكتابة مقال عن النسبية والذي أعجب حتى أينشتاين. استمر باولي في علمه إلى أن اكتشف قانون الاستبعاد، وهو جزء أساسي في النظرية الكمية. عُرف باولي بسلوكه الانتقادي الشديد تجاه الأفكار الجديدة، والذي اعتبرها جميعها هراء ما لم يقتنع بغير ذلك. كان لباولي اهتمام شديد بعلم النفس أيضا، فتواصل مع كارل غوستاف جنغ وكتب عدداً من المقالات في هذا المجال.

مبدأ باولي للاستبعاد

لا يمكن لجسمين فرميين متطابقين أن يشغلا نفس الموجة الكمية أبداً.

ولكن هناك خاصية غريبة للإلكترونات تسمح لإلكترونين أن يتشاركا في مدار أو مستوى. للإلكترونات حالتان داخليتان ممكنة، تسمى عادة غزلاً للأعلى وغزلاً للأسفل. بسبب أنه يمكن تمييز الإلكترون ذي الغزل للأعلى من الإلكترون ذي الغزل للأسفل، فإن إلكتروناً ذا غزل للأعلى وإلكتروناً ذا غزل للأسفل يمكن أن يتشاركا في مدار أو مستوى واحد. فالحد الأعلى المطلق المسموح به من قِبل الفيزياء الكمية ومبدأ باولي للاستبعاد هما إلكترونين.

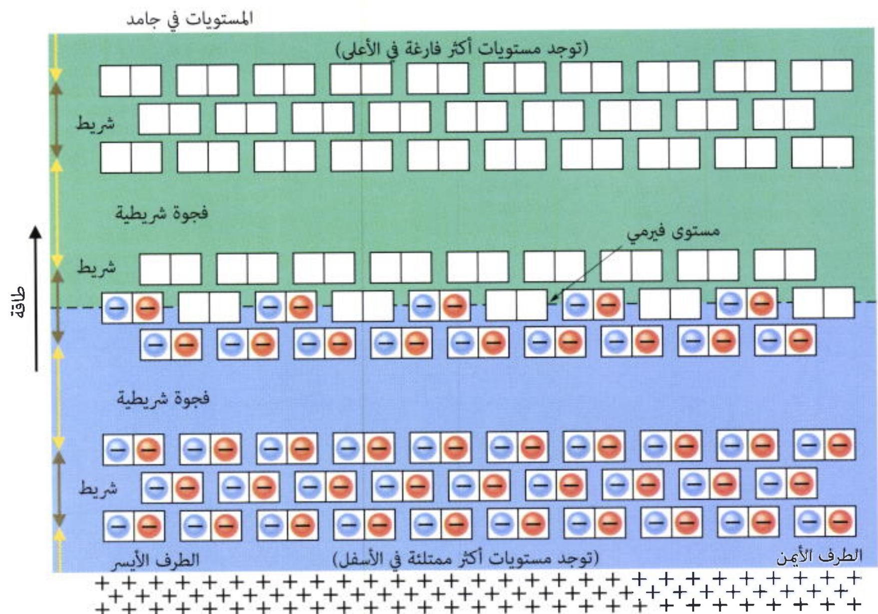
على الرغم من كونه موجة، فإن الإلكترون في المستوى له طاقة كلية محددة - مجموع طاقاته الحركية والكامنة. تلك الطاقة، والتي تعتمد على شكل وتركيب موجة الإلكترون، تحدد أيضا تردد تذبذب الموجة. ووفقا لفيزياء الكم، فإن طاقة الإلكترون الكلية وتردد تذبذب موجته يتناسبان تماما مع بعضهما البعض؛

فالإلكترون ذو الطاقة المنخفضة يتذبذب ببطء بينما الإلكترون ذو الطاقة العالية يتذبذب بسرعة. سوف نعود لهذه الملاحظة في الفصل الرابع عشر، لكن حاليا سنركز على أن كل مستوى، وكل موجة كمية موقوفة في الجامد، له تردد معيّن وطاقة معينة. الموجة الموقوفة الأساسية للجامد لها أقل تردد وأقل طاقة، بينما موجات النغمات الإضافية لها ترددات أعلى وطاقات أعلى بشكل تدريجي.

توصل الفيزيائيون للنظر إلى هذه الموجات الموقوفة على أنها أماكن مجردة، مستقلة عن الإلكترونات التي قد تظهرها وقد لا تظهرها في لحظة معينة. فعندها تتشابه المستويات مع المقاعد في مسرح، والتي قد يُشغل كل منها أو لا يُشغل. وبدلا من القول بأن الإلكترون يواجه موجة موقوفة معيّنة أو مستوى، نقول بأن المستوى يشغله إلكترون. في هذا المنظور المعكوس، يلعب المستوى الدور الأكثر أهمية. فيما تبقى من هذا القسم، سوف ننظر للجامد بهذه الطريقة؛ سنفكر بدلالة المستويات المتوفرة فيه وفيما لو كانت هذه المستويات مشغولة بالإلكترونات أم لا.

يحتوي الجامد على عدد هائل من الإلكترونات وهناك دائما الكثير من المستويات لإسكان تلك الإلكترونات. لكن أي المستويات تشغلها الإلكترونات؟
عند درجات الحرارة المنخفضة بشكل كاف، تشغل الإلكترونات تلك المستويات التي لها أقل طاقة. فلأسباب ديناميكية حرارية، تستقر الإلكترونات في المستويات المتوفرة ذات الطاقة الأقل، بواقع إلكترونين لكل مستوى. وبعد أن يتم إسكان جميع الإلكترونات، تكون الإلكترونات قد ملأت المستويات إلى طاقة قصوى معيّنة. في المنتصف بين أعلى مستوى مملوء وأقل مستوى غير مملوء يقع مستوى فيرمي - وهو مستوى افتراضي يُحدد قمة بحر فيرمي من الإلكترونات. تُسمّى الطاقة التي قد تكون للإلكترون في هذا المستوى الافتراضي بطاقة فيرمي.

يمكن لتشبيهنا بالمسرح أن يوفر مرة أخرى نظرة عميقة لعملية ملء المستويات هذه. يشبه ذلك ما يحدث في عرض شعبي: تمتلئ المقاعد من عند المستوى القريب من الأوركسترا إلى المستويات الأعلى - الجميع يريد أن يجلس في المقاعد المنخفضة (والقريبة). عندما يبدأ العرض، يكون الناس قد ملؤوا جميع المقاعد إلى حد مقاعد علوية معينّة. عند المنتصف بين هذه المقاعد الممتلئة والمقاعد التالية غير الممتلئة يقع مقعد فيرمي الافتراضي.



شكل ٣,١,١٢: تُجمّع المستويات في جامد سوية في أشرطة وتُملأ من المستوى الأقل طاقة للأعلى وصولا لمستوى فيرمي. يمكن لكل مستوى أن يستوعب على الأكثر إلكترونين: إلكترون واحد غزله للأعلى (أزرق) وإلكترون واحد غزله للأسفل (أحمر). الشحنات الموجبة الظاهرة في الأسفل هي أنوية الذرات التي تكوّن هذا الجامد المتعادل كهربائيا.

إذا مثّلنا المستويات تخطيطيا بمربعات ورتبناها رأسيا وفقا للطاقة (شكل ٣,١,١٢)، عندها تحتوي المستويات (المربعات) الأقل من مستوى فيرمي على إلكترونين في كل مستوى، بينما المستويات الأعلى من مستوى فيرمي فارغة. بالرغم من أن الطاقة الحرارية تُعقّد هذه الصورة بعض الشيء بإزاحة الإلكترونات بالقرب من مستوى فيرمي، إلا أنه يمكننا تجاهل هذا التفصيل بالقرب من درجة حرارة الغرفة أو أقل.

بما أن المستويات هي موجات موقوفة، فليس لديها مواقع محددة بوضوح في الفراغ. لكن يمكننا أن نتخيّل بشكل سليم أن كل مستوى يضع إلكتروناته بالقرب من موقع معيّن في الجامد، كما هو موضح في الشكل (٣,١,١٢). في حين هذه الصورة مبسطة أكثر من اللازم، إلا أنها دقيقة بما يكفي لتوضيح الكثير من فيزياء حركة الشحنة في المواد.

بالطبع، ليست الإلكترونات هي الجسيمات الوحيدة في الجامد. للذرات أيضا أنوية موجبة الشحنة. لكن تلك الأنوية هي أساسا غير متحركة ونادرا ما تُساهم في تدفق الكهرباء. بدلا من ذلك، تُشكل الأنوية خلفية منتظمة من الشحنات الموجبة، والموضحة تخطيطيا كإشارات موجبة (+) في أسفل الشكل (٣,١,١٢)، بحيث يكون الجسم متعادلا في كافة أنحائه تقريبا.

تحقق من فهمك #٣: أخذه لمستوى أعلى

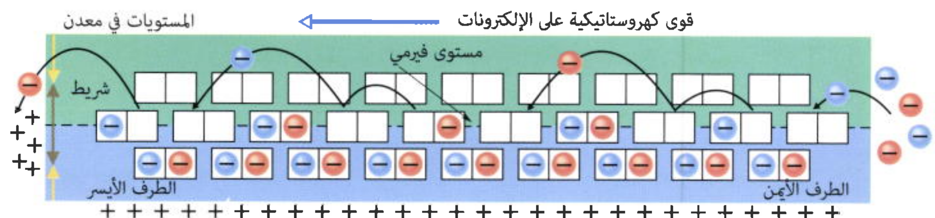
(للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

إذا أضفت إلكترونا واحداً إضافيا لكرة معدنية متعادلة، إلى أي مستوى سيذهب ذلك الإلكترون؟

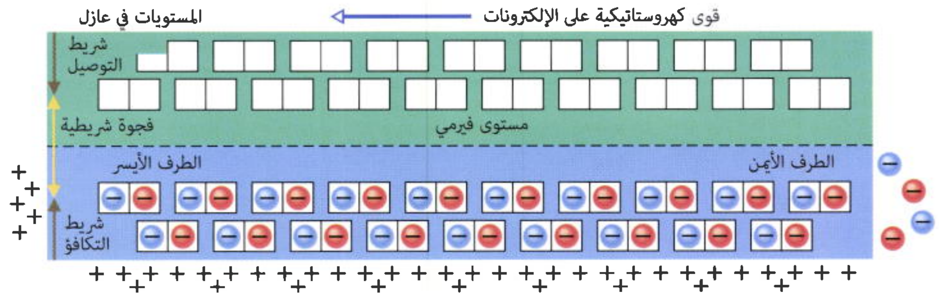
المعادن، والعوازل، وأشباه الموصلات

توجد المستويات في جامد في مجموعات تُسمّى أشرطة. كل شريط يقابل موجات موقوفة لها نوع تركيب معيّن. بما أن المستويات في شريط تتضمن موجات متشابهة، فإنها تتضمن أيضا طاقات متشابهة. بين هذه الأشرطة من المستويات يوجد بعض الأحيان فجوات شريطية – أي مدى من الطاقات لا يوجد بها أي مستويات. لا يحتوي الجامد ولا يمكنه أن يحتوي على إلكترونات بطاقات تقع ضمن فجوة شريطية.
الأشرطة والفجوات الشريطية هي ما يميّز المعادن، والعوازل، وأشباه الموصلات. عندما يقع مستوى فيرمي في فجوة شريطية، يمكنه أن يمنع الإلكترونات في الجامد من الاستجابة لقوى خارجية. لرؤية كيف يحدث ذلك، دعنا نفحص أولا معدناً ومن ثمّ عازلاً.

في المعدن، يقع مستوى فيرمي في منتصف شريط (شكل ٤,١,١٢). بما أن مستويات الشريط الفارغة تقع تماما فوق مستوياته الممتلئة، فإنه يتطلب طاقة قليلة جدا لإزاحة الإلكترونات من المستويات الممتلئة إلى المستويات الفارغة. تسمح هذه الميزة للمعدن بأن يوصل الكهرباء. عندما تضع شحنات موجبة على الجانب الأيسر للمعدن وشحنات سالبة على جانبه الأيمن، فإن إلكتروناته تواجه قوى كهروستاتيكية نـحو اليسار وتبدأ بالحركة إلى اليسار. تتحرك الإلكترونات بالانتقال من المستويات الممتلئة إلى المستويات الفارغة (شكل ٤,١,١٢)، حاصلة على الطاقة اللازمة للوصول لهذه المستويات الفارغة من الشغل المبذول عليها



شـكل ٤,١,١٢: يقع مستوى فيرمي في المعادن في منتصف شريـط. عندما تضـع إلكترونات على يمين المعدن وشـحنات موجبة على يسار المعـدن، فإن الإلكترونات تنزاح نـحو اليسـار خلال المعدن بمساعدة المستويات الفارغة. بما أن هنـاك محصلة تدفق شـحنات في المعدن، فإنه يوصل الكهرباء.



شكل ٥,١,١٢: في العازل، يقع مستوى فيرمي في منتصف فجوة شريطية. عندما تضع شحنات بالقرب من العازل، فإن الإلكترونات في الشريط الممتلئ لا يمكنها الانتقال لإنتاج محصلة من تدفق الشحنات خلال العازل. فلا يمكن للعازل أن يوصّل كهرباء.

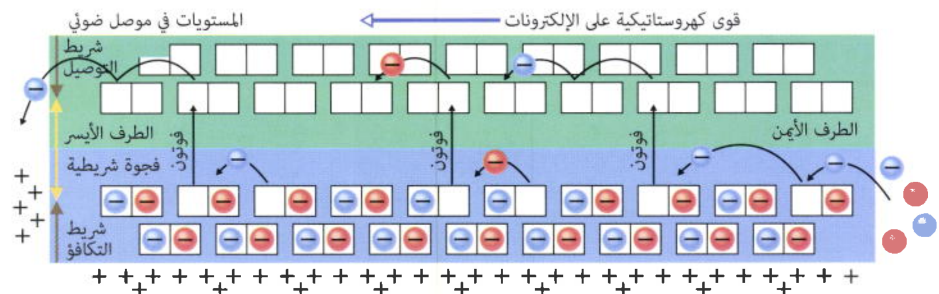
من قِبل القوى الكهروستاتيكية. إجمالا، تدخل الإلكترونات إلى المعدن من يمينه وتخرج منه من يساره، فالمعدن يوصل الكهرباء!

في تشبيهنا بالمسرح، المعدن هو مسرح يكون فيه تقريباً نصف مقاعده فقط التي في الطابق الأرضي ممتلئة. إذا طلبت من الأشخاص في المسرح أن يبدءوا بالانتقال إلى اليسار، فإن الأشخاص القريبين من أقصى المقاعد المشغولة يمكنهم الانتقال بسهولة. كل منهم يجد مقعدا خاليا بقربه على يساره وينتقل إليه. عندها يتمكن أشخاص جُدد من الدخول إلى المسرح من اليمين بينما يُغادر آخرون المسرح من اليسار. هذا المسرح «المعدني» سيكون قد «وصّل» الأشخاص.

على خلاف الوضع في المعادن، فإن مستوى فيرمي في العازل يقع في منتصف فجوة شريطية، بين أعلى أحد الأشرطة وأسفل شريط آخر (شكل ٥,١,١٢). مع عدم توفّر مستويات فارغة سهل الوصول إليها، فإنه يلزم كمية كبيرة من الطاقة لنقل الإلكترونات من مستويات ممتلئة إلى مستويات فارغة. عندما تضع شحنات موجبة على الجانب الأيسر للعازل وشحنات سالبة على جانبه الأيمن، فإن إلكتروناته تواجه قوى كهروستاتيكية نحو اليسار لكنها غير قادرة على الحركة. لكي ينتقل لأحد المستويات الفارغة في الشريط العلوي، فإن الإلكترون في الشريط السفلي سيحتاج لطاقة أكبر من التي يحصل عليها من القوى الكهروستاتيكية. وبما أنه لا يوجد محصلة شحنة تتدفق خلال العازل، فإنه لا يوصّل الكهرباء!

في تشبيهنا بالمسرح، العازل هو مسرح يكون فيه جميع المقاعد في الطابق الأرضي ممتلئة ومقاعد الشرفة فارغة. عندما تطلب من الأشخاص في هذا المسرح أن يبدءوا بالانتقال إلى اليسار، فإنهم لن يستطيعوا القيام بذلك. جميع المقاعد في الطابق الأرضي على اليسار ممتلئة، ولا يمكنهم الوصول إلى الشرفة لاستخدام مقاعدها الفارغة. هذا المسرح «العازل» لن يكون قادرا على توصيل الأشخاص.

في المعدن، يكون شريط المستويات الذي يحتوي على مستوى فيرمي ممتلئاً جزئيا فقط، ويمكن للإلكترونات أن تنتقل بسهولة من المستويات الممتلئة إلى المستويات الفارغة. أما في العازل، فيكون الشريط دون مستوى فيرمي – شريط التكافؤ- ممتلئاً والشريط فوق مستوى فيرمي – شريط التوصيل – فارغاً، مما يجعل مثل هذه الانتقالات صعبة جدا.
لكن حتى في العازل، يمكن للإلكترون أن ينتقل من مستوى تكافؤ (مستوى في شريط التكافؤ) إلى مستوى توصيل (مستوى



شكل ٦,١,١٢: عندما يقع ضوء على عازل، فإن الطاقة في فوتوناته تنقل بعض الإلكترونات من مستويات التكافؤ الممتلئة إلى مستويات التوصيل الفارغة. مثل هذا الانتقال يجعل من الممكن للإلكترونات أن تتحرك استجابة لقوى كهروستاتيكية، فيُصبح العازل موصلاً كهربائياً، أي موصلاً ضوئياً.

في شريط التوصيل) إذا وفّر شيء ما الطاقة اللازمة لذلك الانتقال. أحد مصادر الطاقة هذه هو الضوء. عندما يتعرض العازل للنوع الصحيح من الضوء، فإن ذلك الضوء يمكن أن ينقل الإلكترونات من شريط تكافؤ مادة إلى شريط توصيلها (شكل ٦،١،١٢).

بمجرد أن تظهر الإلكترونات في شريط التوصيل والذي عادة ما يكون فارغا وتظهر مستويات فارغة في شريط التكافؤ والذي عادة ما يكون ممتلئاً، فإن الإلكترونات يمكنها الاستجابة للقوى الكهروستاتيكية. يمكنها أن تنتقل من مستويات ممتلئة إلى مستويات فارغة مجاورة وبالتالي تسير خلال المادة. عندها يمكن للإلكترونات أن تدخل المادة من جانب وتُغادر من الجانب الآخر، فتوصل المادة الكهرباء. وبسبب أن الضوء جعل من هذا العازل موصّلاً، نُسمّي المادة موصلاً ضوئياً.

عودة مرة أخرى لتشبيهنا، فإن دور الضوء في المسرح العازل يقوم به غوريلا لعوب يتمشّى في الطابق الأرضي، ويرمي بالزبائن إلى الشرفة. بوجود مقاعد فارغة فجأة في الطابق الأرضي ومقاعد الشرفة مشغولة فجأة بمرتادي المسرح الدائخين، فإنه يمكن للجمع الآن أن يستجيب لطلبك في التحرك نـحو اليسار. هذا الغوريلا جعل من المسرح العازل موصّلا للأشخاص – والذي يمكنك أن تسميه «موصل غوريللي».

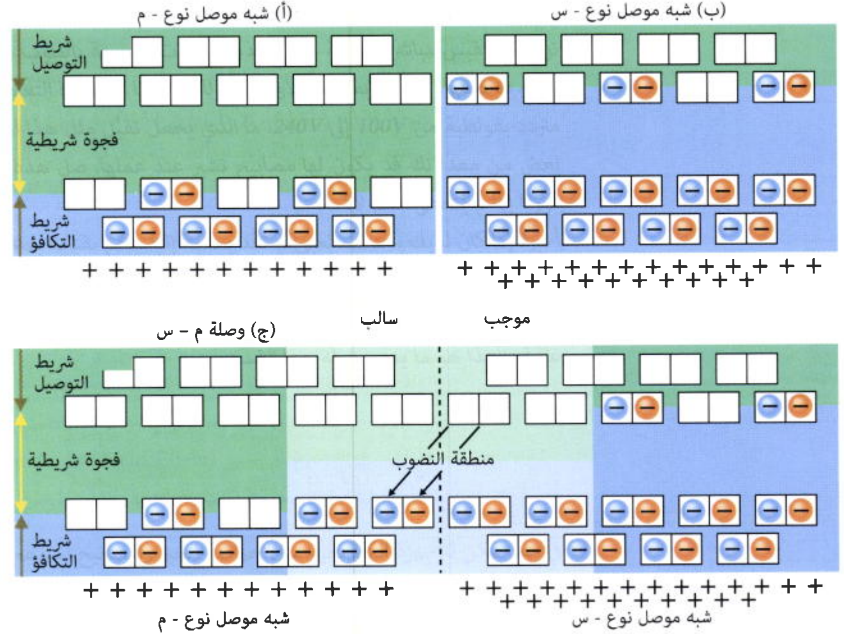
ليس كل الضوء يتسبب في التوصيل الضوئي في عازل. ذلك لأن الضوء ينبعث ويُمتص على هيئة حزم من الطاقة أو كمّات تُسمى فوتونات. وكما هو الحال مع الإلكترون، فإن طاقة الفوتون تتناسب مع تردده؛ كلما زاد تردد الضوء زادت الطاقة التي يحتويها كل فوتون. لنقل الإلكترون عبر الفجوة الشريطية الكبيرة في عازل اعتيادي، فإنه يتطلب ضوءاً ذا طاقة عالية وتردد عال؛ أي يجب أن يتعرض العازل لضوء بنفسجي أو حتى فوق بنفسجي.

لكن الطبيعة توفّر أيضاً مواداً بفجوات شريطية أصغر والتي يمكن تخطيها بمساعدة ضوء ذي طاقة قليلة وتردد قليل مثل الضوء الأحمر أو حتى الضوء تحت الأحمر. تُسمّى هذه المواد أشباه الموصلات لأن خصائصها تقع في مكان ما بين الموصلات والعوازل. لأشباه الموصلات فجوات شريطية صغيرة، مما يجعل من السهل نسبيا للضوء أو الحرارة أو أي نوع آخر من الطاقة أن ينقل الإلكترونات بين مستويات التكافؤ ومستويات التوصيل. في تشبيهنا، يكون المسرح شبه الموصّل مسرحاً عازلاً بشرفة منخفضة، بحيث يمكن حتى لطفل الغوريلا أن يلقي بالأشخاص إليها.

على مدى نصف قرن، عمل العلماء والمهندسون مع أشباه الموصلات لإنتاج عدد كبير مدهش من الأجهزة الإلكترونية. بالاعتناء بتفصيل الأشكال والمكونات الكيميائية لمواد أشباه الموصلات مثل السيليكون، والجيرمانيوم، والجاليوم-أرسيناد (زرنيخيد)، فإنهم تمكنوا من صناعة آلات رائعة لموجات الإلكترون في الجوامد والتي هي بنفس روعة آلات الموجات الموسيقية الموجودة في الأوركسترا العظيمة. وأبسط هذه الآلات الإلكترونية هو الدايود شبه الموصّل.

تحقق من فهمك #٤: توقف واذهب للتسوّق (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

في العديد من مناضد المحاسبة في البقالات، يحمل حزام ناقل الأطعمة إلى المحاسب لكنه يتوقف عندما يصل الطعام إلى النهاية ويحجب شعاعاً ضوئياً. كيف يمكن أن يُستخدم موصل ضوئي لاستشعار هذا الحجب؟



شكل ٧,١,١٢: (أ) لشبه الموصّل نوع - م إلكترونات مفقودة (وأنوية ذرية موجبة مفقودة) ويمكنه أن يوصل الكهرباء خلال شريط تكافئه الممتلئ جزئيا. (ب) شبه الموصّل نوع - س له إلكترونات إضافية (وأنوية ذرية موجبة إضافية) ويمكنه أن يوصل الكهرباء خلال شريط توصيله الممتلئ جزئيا. (ج) عندما يتلامس شبه موصّل نوع - م بشبه موصّل نوع - س، تنتقل إلكترونات مستوى التوصيل من شبه الموصّل نوع - س إلى شبه الموصّل نوع - م، مكوّنة منطقة نضوب مستقطبة كهربائيا عند الوصلة م - س.

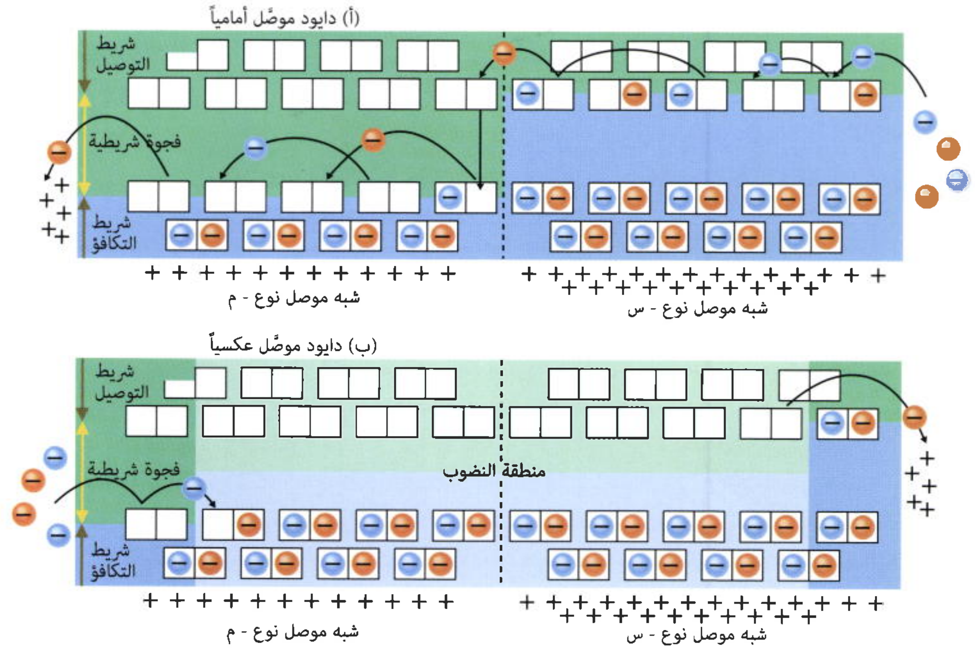
الدايودات

الدايود هو جهاز للتيار ذو اتجاه واحد؛ أي يسمح للتيار بأن يتدفق خلاله في اتجاه واحد لكن ليس في الاتجاه الآخر. على الرغم من أن الدايودات اتخذت أشكالاً عديدة عبر السنوات، إلا أن الدايودات في معدّلات الكهرباء وجميع الأجهزة الإلكترونية الحديثة تقريباً مبنية من أشباه الموصلات.

يُصنع الدايود شبه الموصل بوصل مادتين مختلفتين شبه موصلة سوية. هاتان المادتان شبه الموصلة قد تم تطويرهما بحيث ليس لهما مستويات تكافؤ ممتلئة تماما ولا مستويات توصيل فارغة تماما. بدلا من ذلك، تُطعّم بشوائب ذرية إما أن تكوّن بضعة مستويات تكافؤ فارغة (شبه موصّل موجب - نوع - م، شكل ٧,١,١٢ أ) أو تضع بضعة إلكترونات في مستويات التوصيل (شبه موصّل سالب - نوع - س، شكل ٧,١,١٢ ب). تسمح مستويات التكافؤ الفارغة أو إلكترونات مستوى التوصيل لشبه الموصّلات نوع - م وشبه الموصّلات نوع - س بتوصيل الكهرباء. تُحضر ذرات التطعيم معها المقدار المناسب من الشحنة الموجبة في أنويتها لإبقاء كل من شبه الموصّل الموجب وشبه الموصّل السالب متعادلا كهربائيا.

لكن عندما تلامس قطعة شبه موصّل نوع – م قطعة شبه موصّل نوع – س، فإن شيئا مدهشا يحدث: تتكوّن وصلة م – س عند مكان التقائهما (شكل ٧,١,١٢ ج). لتقليل طاقاتهما الكامنة فإن إلكترونات مستوى التوصيل ذات الطاقة العالية من شبه الموصّل نوع – س تتدفق عبر الوصلة م – س وتملأ مستويات التكافؤ الفارغة ذات الطاقة الأقل في شبه الموصل نوع – م. هذا التدفق للإلكترونات يكوّن شحنات منفصلة. يكتسب شبه الموصّل نوع – س محصلة شحنة موجبة لأن لديه الآن عدد إلكترونات أقل من الشحنات الموجبة. يكتسب شبه الموصّل نوع – م محصلة شحنة سالبة لأن لديه الآن عدد إلكترونات أكثر من الشحنات الموجبة. القوى الكهروستاتيكية من هذه الشحنات المنفصلة تعارض استمرار تدفق الإلكترونات عبر الوصلة وتجلب ذلك التدفق تدريجياً إلى التوقف. عندها يكون كل شيء في حالة اتزان.

بالقرب من الوصلة م – س، هناك الآن منطقة نضوب – أي منطقة قد فرّغ منها تدفق الإلكترونات جميع مستويات التوصيل وملأ فيها جميع مستويات التكافؤ. بعدم وجود إلكترونات في مستوى التوصيل أو وجود مستويات تكافؤ فارغة، فإن منطقة النضوب لا يمكنها أن توصّل كهرباء ولا تستطيع الشحنة عبور الوصلة م – س. منطقة النضوب هي عازل،



شكل ٨،١،١٢: (أ) عندما تضيف إلكترونات إلى جانب نوع - س من الوصلة م - س وتُزيلها من جانب نوع - م، فإن منطقة النضوب تختفي ويمكن للتيار أن يتدفق عبر الوصلة. (ب) عندما تضيف إلكترونات لجانب نوع - م وتُزيلها من جانب نوع - س، فإن منطقة النضوب تزداد سمكا ولا يمكن لأي تيار أن يتدفق عبر الوصلة.

والقطعتان شبه الموصلتان أصبحت دايود.

في تشبيهنا بالمسرح، الوصلة م - س هي شبيهة بمسرح ذي جزئين. في الجزء الأيسر أو «نوع - م»، الشرفة فارغة، وحتى الطابق الأرضي فيه بعض المقاعد الفارغة. في الجزء الأيمن أو «نوع - س»، الطابق الأرضي ممتلئ وهناك أيضا بعض الأشخاص في الشرفة. بما أن هذين الجزئين يتلامسان، فإن الأشخاص في الشرفة اليمنى يلاحظون المقاعد الفارغة في الطابق الأرضي في الجزء الأيسر، ويتسلق قليل منهم بالقرب من مركز المسرح للأسفل من الشرفة اليمنى إلى الطابق الأرضي الأيسر لاستغلال المقاعد الأفضل. بالقرب من مركز المسرح، الطابق الأرضي ممتلئ الآن والشرفة فارغة، مشكّلة بذلك منطقة نضوب لا يمكن أن يتحرك فيها أي شخص إلى اليسار أو اليمين. المسرح لا يمكنه أن يوصّل الأشخاص!

لننظر الآن ماذا يحدث عندما نصل أسلاكاً بكل من نصفي شبه الموصّل ونحاول استخدام بطارية لدفع الإلكترونات عبر الوصلة م - س. إذا دفعنا الإلكترونات يسارا، بإضافتها لجانب نوع - س وإزالتها من جانب نوع - م، فإن منطقة النضوب تصبح أقل سمكا وفي نهاية الأمر تختفي (شكل ٨،١،١٢ أ). نحن نضيف إلكترونات لمستويات توصيل نوع - س وندفعها باتجاه الوصلة م - س. نحن أيضا نزيل الإلكترونات من مستويات التكافؤ نوع - م ونسحبها بعيدا عن الوصلة م - س.

تكوّن الإلكترونات الإضافية في جانب نوع - س والإلكترونات المفقودة من جانب نوع - م فرقاً في الفولطية بين نصفي الدايود. عندما تصل فولطية جانب نوع - م إلى 0.6 V تقريباً فوق فولطية جانب نوع - س، فإن منطقة النضوب في دايود السيليكون تختفي. عندها تتدفق إلكترونات مستويات التوصيل في مادة نوع - س إلى اليسار عبر الوصلة وتهبط إلى مستويات التكافؤ الفارغة في مادة نوع - م. الوصلة م - س توصّل التيار الكهربائي.

في تشبيهنا بالمسرح، نحن نضيف أشخاصاً في اليمين إلى الشرفة نوع - س ونُزيلهم من اليسار من الطابق الأرضي نوع - م. يمكن للأشخاص الجديدين في شرفة نوع - س أن يتحركوا حول المقاعد الفارغة وينتقلوا نحو مركز المسرح. بالمثل، تسمح المقاعد الفارغة في الطابق الأرضي نوع - م للأشخاص بالنزوح بحيث تصبح المقاعد الفارغة متوفرة بالقرب من مركز المسرح. عند تلك النقطة، يمكن للأشخاص في الشرفة نوع - س أن يعبروا إلى الشرفة نوع - م ثم يتسلقوا للأسفل إلى الطابق الأرضي. هناك محصلة تدفق أشخاص إلى اليسار خلال المسرح؛ يوصّل المسرح الأشخاص من اليمين إلى اليسار.

لكن ماذا يحدث عندما نحاول أن نرسل إلكترونات عكسيا خلال الدايود، أي ندفعهم نحو جانب نوع – م ونزيلهم من جانب نوع – س (شكل ٨،١،١٢ ب)؟ في هذه الحالة، تُصبح منطقة النضوب أكثر سمكا بينما نعبئ مستويات التكافؤ الفارغة في جانب نوع – م ونزيل إلكترونات من مستوى التوصيل من جانب نوع – س. تمنع منطقة النضوب العريضة الشحنة من التحرك ولا يتدفق أي تيار عبر الوصلة م – س. أي يظل عازلاً. في التشبيه بالمسرح، نحن نزيل أشخاصاً في اليمين من شرفة نوع – س ونضيفهم إلى اليسار للطابق الأرضي نوع – م. عما قريب تكون الشرفة نوع – س فارغة تقريباً والطابق الأرضي نوع – م ممتلئاً تماما. الآن أصبح كل المسرح منطقة نضوب ويتصرف كالمسرح العازل. لا يمكن لأحد أن يتحرك ولا يمكن للمسرح أن يوصّل الأشخاص.

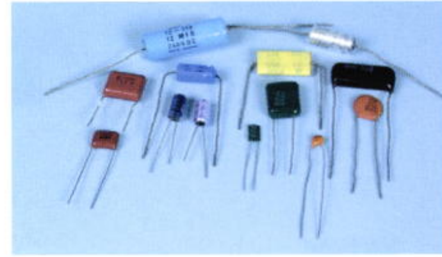
بما أن الوصلة م – س تسمح للتيار بالتدفق في اتجاه ولكن ليس في الآخر، فإن الوصلة هي دايود. لأسباب تاريخية، يُسمى جانب نوع – م في الدايود مصعد (آنود) وجانب نوع – س يُسمى مهبط (كاثود). يمكن للتيار، والذي هو تدفق الشحنة الموجبة، أن يمر خلال الدايود من مصعده إلى مهبطه فقط. بما أن التيار يتدفق طبيعيا من الفولطية الأعلى إلى الفولطية الأقل، فإن الدايود يحمل تياراً عندما يكون توصيله أمامياً فقط، أي عندما يكون لمصعده فولطية أكبر من مهبطه. عندما يكون التوصيل عكسياً – أي عندما يكون لمصعده فولطية أقل من مهبطه – لا يتدفق تيار خلال الدايود. هذه الإمكانية للتحكم في اتجاه تدفق التيار هي أساسية لتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر.

حتى عندما يكون الدايود موصّلاً أماميا، فإن منطقة النضوب لن تختفي إلى أن تصبح فولطية المصعد أعلى بكثير من فولطية المهبط. على سبيل المثال، يجب أن يكون لدايود السيليكون الاعتيادي هبوط فولطي مقداره حوالي 0.6 V لكي يوصّل التيار. بما أن التيار المار خلال الدايود يفقد فولطية، فإن كل شحنة تفقد طاقة في الدايود. على الرغم من أن تلك الطاقة المفقودة مهدرة كحرارة عادة، إلا أننا في الفصل الرابع عشر سنفحص الدايودات التي تستخدم هذه الطاقة المفقودة في انبعاث ضوء.

يُعد إنتاج الحرارة المهدرة مشكلة للدايودات والمكونات شبه الموصلة الأخرى لأنه قد يتسبب في زيادة تسخين هذه المكونات. يمكن للطاقة الحرارية، مثل الضوء، أن تنقل الإلكترونات من مستويات تكافؤ شبه الموصل إلى مستويات توصيله، بحيث يوصّل مقداراً صغيراً من التيار. على الرغم من أنه مهمل بالقرب من درجة حرارة الغرفة، إلا أن هذا التوصيل المستحث بالحرارة يتزايد بزيادة حرارة شبه الموصل. فوق درجة حرارة معيّنة، تؤدي التيارات المتدفقة بسبب التوصيل المستحث بالحرارة إلى المزيد من التسخين وفي نهاية الأمر إلى كارثة هروب حراري. لتجنب مثل هذه الحوادث الحرارية، والتي تتضمن عادة دخاناً والكثير من التعاسة، فإنه يجب أن لا تعمل الأجهزة الإلكترونية شبه الموصّلة عند درجة حرارة عالية، وكثيراً ما تُبرّد بمراوح.

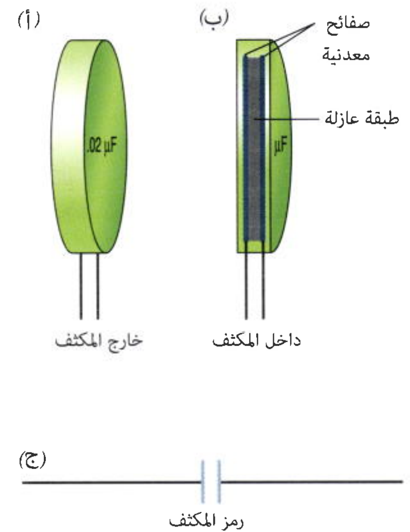
تحقق من فهمك # ٥: هو طريق ذو اتجاه واحد (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

ما الذي سيحدث إذا أضفت وصلة م – س (دايود) في دائرة تيار متردد تصل شركة الكهرباء بمصباح المكتبي؟



بإذن لو بلومفيلد

شكل ٩،١،١٢: تختزن المكثفات الشحنات الكهربائية المنفصلة. يحتوي كل من هذه المكثفات على سطحين موصلين منفصلين بطبقة عازلة رقيقة.



شكل ١٠،١،١٢: (أ) المكثّف في الغالب هو قرص أو أسطوانة ذات سلكين ناتئين. تُطبع سعته على سطحه. في الداخل (ب)، تتصل الأسلاك بلوحين موصلين منفصلين عن بعضهما بطبقة رقيقة عازلة. (ج) في الرسم التخطيطي لجهاز إلكتروني، يُمثّل المكثّف بخطين متوازيين.

المكثفات

إن المكوّن الإلكتروني الآخر الجديد في المعدّل الكهربائي هو مكثّفه، جهاز يُخزّن شحنات كهربائية منفصلة (شكل ٩،١،١٢). يتكوّن المكثّف من لوحين موصلين منفصلين عن بعضهما البعض بطبقة رقيقة عازلة (شكل ١٠،١،١٢). عندما يكون أحد اللوحين موجب الشحنة والآخر سالب الشحنة، فإن الشحنات المختلفة تجذب بعضها البعض. يسمح هذا التجاذب للّوحين بتخزين كميات كبيرة من الشحنات المنفصلة، مع إبقاء المكثّف بأكمله متعادلا كهربائيا.

يمكنك شحن ألواح المكثّف بنقل الشحنة من لوحه السالب إلى لوحه الموجب. يُخزّن الشغل الذي تقوم به أثناء هذا الانتقال في المكثّف كطاقة كهروستاتيكية كامنة ويتحرر عندما تدع الشحنات المنفصلة ترجع سوية لبعضها البعض. يعمل المكثّف المشحون كبطارية عند وصله بدائرة كهربائية لأنه يدفع الشحنات خلال الدائرة من لوحه الموجب ويجمع تلك الشحنات من الدائرة الكهربائية بلوحه السالب.

بما أن الشحنة (الموجبة) لها طاقة كهروستاتيكية أكبر على اللوح الموجب مقارنة باللوح السالب، فإن فولطية اللوح الموجب أعلى من فولطية اللوح السالب. يتناسب فرق الفولطية بين اللوحين مع الشحنات المنفصلة التي عليها؛ فكلما زادت الشحنات المنفصلة التي يحملها المكثّف، زاد فرق الفولطية بين لوحيه.

يعتمد هذا الفرق في الفولطية أيضا على تركيب المكثّف. يسمح تكبير الألواح للشحنات المتماثلة على كل لوح بأن تنتشر، بحيث تتنافر مع بعضها البعض بشدة أقل. ويسمح ترقيق الطبقة العازلة بين اللوحين للشحنات المختلفة على اللوحين بأن تتحرك مقتربة من بعضها البعض، بحيث تجذب بعضها البعض بشدة أكبر. كلا هذين التغييرين يخفّض الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة للشحنات المنفصلة وتباعا الفرق في الفولطية بين اللوحين.

بسبب أن هذه التغيرات تسمح للمكثّف بتخزين الشحنات المنفصلة بسهولة أكبر، فإنها تزيد من سعة المكثّف، أي الشحنات المنفصلة التي يحملها مقسومة على الفرق في الفولطية بين لوحيه. وحدة السعة في النظام العالمي SI هي الكولوم - لكل - فولت، وتسمى أيضا فاراد (اختصارا F). المكثّف ذو سعة واحد فاراد يُخزّن عدداً هائلاً من الشحنات المنفصلة، حتى عند فرق فولطية منخفض، بينما المكثف ذو سعة جزء من البليون من الفاراد هو المعتاد أكثر. الحرف اليوناني μ أمام الرمز F يعني جزءاً من المليون (μF أو ميكروفاراد)، والحرف n أمام الرمز F يعني جزءاً من البليون (nF أو اختصارا نانوفاراد)، والحرف p أمام الرمز F يعني جزءاً من التريليون (pF أو بيكوفاراد). تكتب سعة المكثّف على غلافه، غالبا بالهيئة المختصرة.

تحقق من فهمك # ٦: الشحن (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

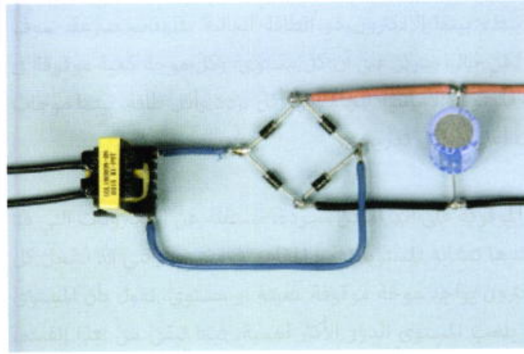
يحصل مضخم الاستريو الخاص بك على الكهرباء من سلك الكهرباء. بما أن سلك الكهرباء لا يوصّل أي كهرباء أثناء اللحظات التي يعكس فيها التيار المتردد اتجاهه، فإن مزوّد الطاقة للاستريو يجب أن يختزن طاقة. كيف يمكنه أن يقوم بذلك؟

المعدّل الكهربائي الكامل

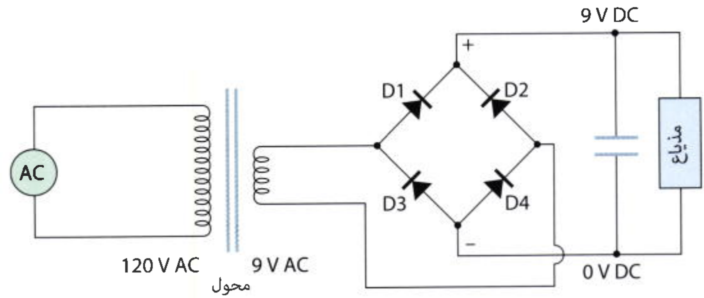
يستخدم معدّلنا الكهربائي محوّلا، وأربعة دايودات، ومكثّفاً لكي يوفر تياراً مستمراً ذا فولطية منخفضة للمذياع. التوصيلات بين هذه المكونات موضحة فوتوغرافيا في الشكل (١١,١,١٢ أ) وتخطيطيا في الشكل (١١,١,١٢ ب). يستخدم المهندسون والعلماء مثل هذا الرسم التخطيطي لتمثيل الأجهزة الإلكترونية المعقدة، بتعيين رموز محددة لكل مكوّن إلكتروني وبالإشارة للتوصيلات الكهربائية بين هذه المكوّنات بخطوط.

دعنا نفحص الشكل (١١,١,١٢) من اليسار إلى اليمين. المكوّن في أقصى اليسار هو المحوّل. يحمل الملف الابتدائي للمحوّل تيارا متردداً من مقبس يوفر تيار متردد ذا 120V ، فينشأ في ملفه الثانوي قوة دافعة كهربائية مستحثة مترددة ذات 9V. أي يعمل الملف الثانوي كمصدر طاقة يوفر تيار متردد بفوطية 9V.

إذا كنت ستصل مصباحاً ذا 9V لطرفي هذا الملف الثانوي، فإن قوة الملف الدافعة الكهربائية المستحثة والمترددة ستدفع تيارا مترددا خلال فتيلة المصباح فيضيء. لكن إذا كنت ستصل المذياع ذا الـ9V لهذا الملف الثانوي، فإن قوة الملف الدافعة الكهربائية المترددة ستحاول أن تدفع تيارا مترددا خلال ذلك المذياع ولن يعمل. لا يستطيع المحوّل وحده أن يوفّر التيار المستمر المستقر الذي يتطلبه المذياع.



بإذن لو بلومفيلد



شكل ١١,١,١٢: (أ) يحتوي المعدل الكهربائي الاعتيادي على محوّل، وأربعة دايودات، ومكثّف. (ب) نفس المكوّنات موضحة تخطيطيا.

تحل الدايودات في منتصف الشكل (١١,١,١٢) مشكلة التردد بتوجيه التيار بحيث يتدفق دائما خلال سلك الكهرباء الموجب إلى المذياع، ويعود من المذياع خلال سلك الكهرباء السالب. بالرغم من أن الملف الثانوي للمحوّل يستمر في مواجهة قوة دافعة كهربائية مستحثة مترددة ويحمل تيارا مترددا، إلا أن الدايودين D1 و D2 يوجّهان التيار من الملف الثانوي إلى المذياع، والدايودانD3 و D4 يوجّهان التيار العائد إلى الملف الثانوي. على الرغم من أن المحوّل ذاته يوفّر تيار كهربائي متردد ، إلا أن الدايودات تسمح لمعدّل الكهرباء بتوفير تيار كهربائي مستمر.

ولكن الدايودات وحدها لا يمكنها أن توفّر تيار كهربائي مستمر ثابتة. بينما تتردد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف الثانوي، فإن ارتفاع الفولطية من سلك الكهرباء السالب للمعدّل الكهربائي إلى سلكه الموجب يتذبذب للأعلى وللأسفل. يصل ذلك الارتفاع في الفولطية لقمته عند حوالي 12V عندما تصل القوة الدافعة الكهربائية المستحثة لأعلى قيمتها الموجبة أو أعلى قيمتها السالبة، لكن يهبط إلى الصفر عندما تغيّر القوة الدافعة الكهربائية إشارتها. يوفّر المحوّل والدايودات وحدها كهرباء نبضية ذات فولطية 9V - شكل من أشكال التيار المستمر والذي يُقدّم نفس متوسط القدرة كتيار كهربائي مستمر ذا 9V، لكن بتذبذبات فولطية شديدة. بما أن المذياع سينطفئ بين النبضات، فإن كهرباء التيار المستمر النبضية لن تنفع.

يحل المكثّف مشكلة النبض بتخزين الشحنة والطاقة كلما كانت نبضة التيار الكهربائي المستمر قريبة من قمتها وتحرير تلك الشحنة والطاقة عندما تكون نبضة التيار الكهربائي المستمر قريبة من حدها الأدنى. يعمل المكثّف كبطارية قابلة لإعادة الشحن، فيشحن كلما كانت الطاقة وفيرة ويفرّغ كلما كانت شحيحة.

عندما تكون القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف الثانوي قوية، يكون أحد الدايودين D1 أو D2 موصلاً أماميا ويوجّه التيار من الملف الثانوي لكل من المذياع والطرف الموجب للمكثّف. في نفس الوقت، أحد الدايودين D3 أو D4 موصل أماميا ويوجّه التيار من كل من المذياع والطرف السالب للمكثّف عائدا إلى الملف الثانوي. يستقبل المذياع تيار كهربائي مستمر الذي يحتاجه ويُجمّع المكثّف المزيد من الشحنات المنفصلة تدريجياً. يتزايد الفرق في الفولطية بين طرفي المكثّف و«ينشحن» المكثف.

عندما تكون القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف الثانوي ضعيفة، فإن جميع الدايودات الأربعة موصلة عكسيا ويتوقف التيار عن التدفق خلال الملف. يأخذ المكثّف مهمة توفير الكهرباء إلى المذياع. يتدفق التيار من الطرف الموجب للمكثّف خلال سلك الكهرباء الموجب إلى المذياع ويعود من المذياع خلال سلك الكهرباء السالب إلى طرف المكثّف السالب. ما يزال المذياع يستقبل تيار كهربائي مستمر الذي يحتاجه، لكن الآن يفقد المكثّف شحناته المنفصلة تدريجياً. يتناقص الفرق في الفولطية بين طرفيه و«يُفرّغ» المكثّف.

بالشحن والتفريغ بهذه الطريقة، «يُرشّح» المكثّف نبضة تيار كهربائي مستمر الموفّرة من المحوّل والدايودات. يمهد المكثّف كلا من قمم الفولطية وصفرية الفولطية. بالرغم من أن فولطية هذاالتيار الكهربائي المستمر المرشحة تتذبذب بشكل طفيف بينما ينشحن المكثّف ويتفرّغ، إلا أنه يمكن للمذياع أن يعمل به. مثل العديد من الأجهزة الإلكترونية التي تقبل المعدّلات الكهربائية، فإن المذياع له نظامه الخاص لتقبّل تذبذبات الفولطية الطفيفة بحيث لا تؤثر على أدائه. طالما يستقبل المذياع تياراً مستمراً بالفولطية الصحيحة تقريبا، فإنه سيعمل كما لو كان يعمل ببطاريات.

تحقق من فهمك # ٧: الموجات البطيئة

(للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

تعمل المعدلات الكهربائية في الولايات المتحدة من تيار كهربائي متردد 60Hz بينما في أوربا تعمل من تيار كهربائي متردد 50 Hz. في أي منطقة تعاني المعدلات الكهربائية مشاكل أكثر في المحافظة على فولطية خارجة ثابتة؟



٢-١٢ المشغلات الصوتية

أحدثت المشغلات الصوتية ثورة في الأنظمة الموسيقية المتنقلة. أينما نظرت ترى أناساً يضعون السماعات ويستمعون لأغانيهم المفضلة بهذه الأعاجيب الإلكترونية الصغيرة. جزء من المشغّل الصوتي هو كمبيوتر وجزء هو نظام استريو في توليف رائع لبعض من أعظم أشكال التقنية الإلكترونية الحديثة. بسبب أنها تحتوي على مدى واسع من المكوّنات الإلكترونية، فإن المشغلات الصوتية توفر تقدماً ممتازاً للكثير من الإلكترونيات الحديثة.

لفهم كيفية عمل المشغلات الصوتية، سنحتاج للنظر في كيفية تمثيل الصوت إلكترونيا وكيفية تخزين هذا التمثيل الإلكتروني، واسترجاعه، وفي نهاية الأمر استخدامه لإعادة تكوين الصوت ذاته. سيأخذنا هذا الاستكشاف على طول الطريق من العالم الرقمي للكمبيوترات إلى العالم التناظري لمضخمات الاستريو وسمّاعات الرأس.

هذا الاستكشاف سيعرّضنا أيضا لتلك الآلة المتميزة في الإلكترونيات الحديثة: الترانزيستور. في حين بُنيت الأجهزة الصوتية الإلكترونية الأولى بصمامات مفرّغة، إلا أن تلك المكونات الكبيرة نسبيا أهدرت الطاقة واستُهلكت سريعا. جعل الترانزيستور الإلكترونيات الصوتية عملية أكثر. كما جعلت الكمبيوترات صغيرة ورخيصة الثمن بحيث يمكن لكل مشغّل صوتي أن يكون له كمبيوتره الخاص.

أسئلة للتفكير

ماذا يعني أن تخزّن أغانيّ؟ كيف يمكن للكمبيوتر أن يستخدم أرقاماً لتمثيل الموسيقى؟ لماذا يحتاج المشغّل الصوتي قدرة كهربائية لكي يعمل؟ لماذا يسخن المشغّل الصوتي حينما يعمل؟ هل يؤثر ارتفاع الصوت على عمر البطارية؟ ماذا يعني تصنيف قدرة المضخّم الصوتي؟ كيف ترتبط القدرة الكهربائية بارتفاع الصوت؟ كيف تؤثر مفاتيح الطبقة العالية *(treble)* والطبقة المنخفضة *(bass)* على الصوت؟

تجارب يمكن القيام بها

ابحث عن مشغّل صوتي أو جهاز صوتي رقمي مثل مشغّل الأقراص المدمجة *(CD)* أو أقراص الفيديو الرقمية *(DVD)*. شغّله ولاحظ أنه يأخذ وقتا قصيرا «للاستيقاظ». أنت تشاهد عملية بدء تشغيل كمبيوتر. لكن إذا كانت جميع معلومات

الكمبيوتر بداخله مسبقا، لماذا يحتاج أن يقوم بشغل كبير عند تشغيله؟ كما سنرى قريبا، يستخدم كمبيوتره أنواعاً مختلفة من الذاكرة، بعضها تُمسح تماما عند إغلاق المشغّل الصوتي. بهذه المعلومة في بالك، حاول أن تتخيّل ماذا يحدث أثناء عملية بدء التشغيل.

شغّل بعض الموسيقى وجرّب مفاتيح التحكم بالصوت. يحدد مفتاح ارتفاع الصوت مقدار القدرة التي تصل سماعات الرأس. تذكّر أن الكشاف الضوئي بتوصيلات رديئة ينتج ضوءاً خافتاً. إذا أنشأت توصيلات رديئة بين المشغّل والسمّاعة، ماذا سيحدث لارتفاع الصوت؟ أين ذهبت القدرة المفقودة؟
الآن جرّب مفاتيح التحكم بطبقات الصوت المنخفضة والعالية. إذا كان للمشغّل الصوتي تأثيرات صوتية أخرى، جرّبها. هل مازلت تسمع الصوت كما كان في العزف الأصلي؟ كيف يؤثر ضبط نغمات المشغّل على إعادة إنتاج الصوت؟ هل التقليد الممتاز للصوت الأصلي هو دائما ما تريد سماعه؟

تمثيل الصوت: التناظري والرقمي

لا يخزّن المشغّل الصوتي الصوت مثل ما أن أقراص الفيديو الرقمية لا تُخزّن الضوء الوميضي. بدلا من ذلك، يخزّن المشغّل الصوتي تمثيلا للصوت يمكن أن يستخدمه لإعادة إنشاء ذلك الصوت عند الطلب. توجد معلومات مُختزنة في ذاكرة المشغّل كافية لإعادة إنتاج عدد من الأغاني بشكل مثالي. لكن بين الميكروفون الذي جمع تلك المعلومات ابتداء وبين سمّاعات الرأس التي تعيد بناء الصوت ذاته في نهاية الأمر يوجد عدد من العمليات الإلكترونية المبهرة. في هذا القسم، سوف نستكشف الرحلة التي تأخذها هذه المعلومات الصوتية بين التسجيل والتشغيل. بالقيام بذلك، سنواجه العديد من الأسس الإلكترونية غير المقتصرة على الإلكترونيات الصوتية، بل الممتدة للكمبيوترات الرقمية أيضا.

مهمتنا الأولى في محاولة تتبع المعلومات الصوتية، بينما تتحرك خلال مشغّل صوتي، هي فهم تقنيتين مختلفتين يستخدمهما المشغّل لتمثيل الصوت: التناظرية والرقمية. لنبدأ بهذه المهمة بالتفكير حول عملية التسجيل وحول ماهية المعلومات التي تجمعها تلك العملية من الصوت الأصلي. في الفصل التاسع، تعلمنا أن الصوت في الهواء هو موجة كثافة وأنك تسمع الموجة الصوتية خلال تذبذب ضغط الهواء المرتبط بها. يُحاكي التسجيل الصوتي سمعك بقياس تذبذبات ضغط الهواء عبر الزمن وحفظ هذه القياسات في شكل مفيد. تستخدم إعادة إنتاج الصوت هذه القياسات لإعادة إنتاج صورة طبق الأصل تماما من التذبذبات في ضغط الهواء الأصلية وبالتالي تعيد إنشاء صوت الفنانين أنفسهم.

يبدأ التسجيل بالميكروفونات، والتي هي ببساطة مستشعرات كهروميكانيكية حساسة لضغط الهواء. ينتهي التشغيل بسماعات الرأس أو الأذن، والتي هي أجهزة كهروميكانيكية للتأثير على كثافة الهواء وضغطه. بين الميكروفونات وسمّاعات الرأس توجد بعض الإلكترونيات المبهرة.

تصل الميكروفونات وسماعات الرأس عالم الصوت الحقيقي بعالم التمثيل الإلكتروني للصوت. ما يغادر الميكروفون هو تمثيل إلكتروني للصوت، وليس الصوت ذاته. حينما يتذبذب ضغط الهواء عند الميكروفون للأعلى وللأسفل حول الضغط الجوي، فإن الميكروفون ينتج تيارا يتذبذب ذهابا وإيابا حول الصفر. هذا التيار المتذبذب هو تمثيل تناظري للصوت، أي أنه كمية فيزيائية متغيرة باستمرار (تيار) تمثّل كمية فيزيائية أخرى متغيرة باستمرار (ضغط جوي). مثل أي تمثيل تناظري، فإن الميكروفون يرسم تناظراً بين كميتين فيزيائيتين متغيرة باستمرار: يعمل التيار كنظير لضغط الهواء. أما سمّاعات الرأس فهي ترسم التناظر العكسي. لكن في حين تستمر أجزاء من المشغّل الصوتي في استخدام تمثيلات تناظرية للصوت، إلا أن أجزاء أخرى تستخدم تمثيلا مختلفا: التمثيل الرقمي. في التمثيل الرقمي، تُمثّل الكمية الفيزيائية المتغيرة باستمرار بمجموعة من الكميات الفيزيائية - أي مجموعة من الخانات - كل منها يمكنه أن يحتوي على عدد محدود فقط من القيم المتفردة. في التمثيل الرقمي للصوت، تُقاس تغيرات ضغط الهواء رقميا بوحدات معينة وهذه القيم الرقمية تمثّل بعدها بمجموعة من الخانات. تُستخدم التمثيلات الرقمية بشكل واسع في الكمبيوترات، والتي تمثّل كل شيء يمكن أن تتخيله بأعداد وبعدها تمثّل هذه الأعداد كمجموعة من الخانات.

على سبيل المثال، افترض أن ضغط الهواء الحالي عند الميكروفون هو 124 وحدة فوق الضغط الجوّي. نمثل أولا الزيادة في ضغط الهواء بالرقم 124 ثم نمثّل الرقم 124 بمجموعة من الخانات. مثلا، يمكن أن يُحلّل الرقم 124 إلى خانات عشرية 1، و 2، و4 وبعد ذلك تُمثّل هذه الخانات العشرية كثلاث كميّات فيزيائية، مثل الشحنات، أو التيارات، أو الفولطيات. بما أن كل شحنة أو تيار أو فولطية عليها فقط أن تُمثّل الأعداد الصحيحة من 0 إلى 9، فإن قيمتها لا يجب أن تكون دقيقة جدا. إذا كان من المفترض أن تُمثّل الفولطية 4V الخانة 4، فإن 3.9V أو 4.1V سيُفهم أنها تعني أيضا 4.

في الحياة اليومية، في الغالب نفكك الأرقام لآحاد، وعشرات، ومئات، وآلاف، وهكذا – قوى العدد 10 – لأننا نُفكّر ونعمل بالنظام العشري. لكن يمكننا أيضاً أن نفكك الأعداد إلى واحد، واثنين، وأربعة، وثمانية، وستة عشر وهكذا. فبدلا من استخدام قوى العدد 10، كما هو الحال في النظام العشري، سنكون قد استخدمنا قوى العدد 2. يُسمى هذا النظام والذي يُمثّل الأعداد بقوى العدد 2 نظام العدّ الثنائي.

في نظام العدّ العشري، تُكتب 124 كـ 124، أي أن 124 تعني أنها تحتوي 1 مئات (10^2)، و 2 عشرات (10^1)، و4 آحاد (10^0). عند جمع هذه الأجزاء سوية، 100+20+4، تحصل على 124. في نظام العدّ الثنائي، تُكتب 124 كـ 1111100، أي أن 124 تعني أنها تحتوي 1 أربعة وستين (2^6)، و1 اثنين وثلاثين (2^5)، و1 ستة عشر (2^4)، و1 ثمانية (2^3)، و1 أربعة (2^2)، و0 اثنانات (2^1) و٠ آحاد (2^0). عند جمع هذه الأجزاء سوية، 64 + 32 + 16 + 8 + 4، فإنها تساوي مرة أخرى 124. هذه الطريقة التي تظهر أنها معقدة لتمثيل حتى الرقم الصغير نسبيا هي في الحقيقة مفيدة جدا. لقد تم تفكيك الرقم إلى أجزاء لها قيمتان ممكنة فقط. إما أن يوجد هناك اثنان وثلاثون في الرقم الممثّل أو لا. الرمزان الوحيدان اللذان تحتاجهما عند تمثيل عدد في النظام الثنائي هو 0 و 1.

بما أن 124 هي 1111100 في نظام العدّ الثنائي، فيمكنك تمثيل 124 بشحنة أو تيار أو فولطية سبعة أجسام منفصلة. الأجسام الخمسة الأولى ستحتوي على 1 (واحدات) بينما الاثنان الأخيران ستحتوي على 0 (أصفار). على سبيل المثال، إذا كانت الأجسام السبعة مكثّفات، فإن الخمسة الأولى قد تحمل شحنات منفصلة بينما المكثفان الأخيران لا تحمل أي شحنة. الجهاز الذي يحتاج لمعرفة العدد الذي يمثله المكثّفات سيقيس شحناتها. بإيجاد شحنات منفصلة في المكثّفات الخمسة الأولى (11111) وانعدام الشحنات المنفصلة في المكثفين الأخيرين (00)، سيتحدد أن المكثّفات تُمثّل 1111100 في نظام العدّ الثنائي أو 124.

نظام العدّ الثنائي مفيد لأن الأجهزة الإلكترونية السريعة التي تعمل فقط بين قيمتين قصوتين سهلة البناء نسبيا: التيار إما مفتوح أو مغلق، والفولطية موجبة أو سالبة، والشحنة إما موجودة أو مفقودة. من الأصعب بناء أجهزة سريعة توصّل التيارات، أو الشحنات، أو الفولطيات المعينة المطلوبة في التمثيل العشري أو حتى التمثيل التناظري. إن التمثيل التناظري أيضا حسّاس للعيوب الإلكترونية والضوضاء لأن الجهاز التناظري الذي يحاول أن يمثّل 124 بفولطية مقدارها 124 V قد ينتج بطريق الخطأ 123V أو 125V. تخيّل كمبيوتراً بنكياً لا يستطيع أن يميّز بين $124 أو $123أو $125! على الرغم من أن تمثيل 124 في النظام الثنائي يأخذ على الأقل سبع كميات منفصلة، إلا أنه لا يوجد أي لبس حول أي عدد تم تمثيله.

تحقق من فهمك #١: رياضيات جديدة (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

ما هو العدد الذي يمثله 10000001 في نظام العدّ الثنائي؟

المقاومات

بعد تلك المقدمة عن تمثيل المعلومات، نحن جاهزون للنظر في كيفية عمل المشغّل الصوتي بمعلوماته. لقد سبق وأن أشرنا لحقيقة أن هذه المعلومات تسير داخل المشغّل كتيارات، وفولطيات، وبعض من الكميات الفيزيائية الأخرى. لكن ما هي

الأدوات التي يستخدمها المشغّل للعمل مع هذه الكميات الفيزيائية؟

إن أدوات المشغّل هي في الأساس إلكترونية ومن المفرح أن العديد منها مألوف بالنسبة لنا. لقد سبق وأن تعرضنا للمكثّفات، والملفات الحثّية، والمحوّلات، والدايودات، والتي هي كلها شائعة في المشغّلات الصوتية ومعظم الأجهزة الإلكترونية الأخرى. ولكن هناك على الأقل اثنان من المكوّنات الإلكترونية لا يمكن لأي مشغّل صوتي أو جهاز إلكتروني ذي تقنية عالية أن يخلو منها: المقاومات والترانزستورات.



بإذن لو بلومفيلد

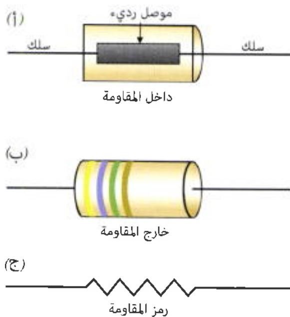
شكل ١,٢,١٢: المقاومات هي أجهزة أومية تعيق تدفق التيار وتنتج هبوطاً في الفولطية. فهي تحوّل بعض القدرة الكهربائية للتيار إلى قدرة حرارية. يمكن للمقاومات الكبيرة أن تتحمّل قدرة حرارية كبيرة دون أن تزداد في التسخين.

تكمل المقاومات ثلاثية المكوّنات الإلكترونية والتي بدأت بالملفات الحثّية والمكثّفات. كما رأينا في الفصل الحادي عشر، يستخدم الملف الحثّي قوته الدافعة الكهربائية المستحثة لإنتاج ارتفاع فولطي يتناسب مع سرعة تغيّر التيار مع الزمن. وفي القسم السابق، تعلمنا أن المكثّف يستخدم قدرته على تخزين الشحنة لإنتاج ارتفاع فولطي يتناسب مع مجموع التيار عبر الزمن. الذي نفقده هو جهاز يستخدم مقاومته الكهربائية لإنتاج ارتفاع فولطي يتناسب ببساطة مع التيار. ذلك الجهاز المفقود هو المقاومة.

المقاومة هي مجرد سلكان موصلان بجهاز أومي، أي موصّل للكهرباء غير مثالي (شكل ١,٢,١١ و ٢,٢,١١). بما أن التيار يتدفق خلال الجهاز الأومي فقط إذا وُجد مجال كهربائي يدفعه إلى الأمام، فإن المقاومة الحاملة للتيار يجب أن يكون لها هبوط فولطي عبرها. وفقا لقانون أوم (انظر قسم ١٠-٣)، هذا الهبوط الفولطي يتناسب مع التيار في المقاومة.

لكن الهبوط الفولطي خلال مقاومة يتناسب أيضا مع مقدار المقاومة الكهربائية للمقاومة – مع مقدار عدم مثاليتها كموصّل. كلما كبرت مقاومتها، قل التيار المتدفق خلال المقاومة عند هبوط فولطي معيّن. بعض المقاومات موصلات جيدة نسبيا (مقاومة «منخفضة») بينما مقاومات أخرى موصلات رديئة نسبيا (مقاومة «عالية»).

كما رأينا في القسم ١٠-٣، تُعرّف المقاومة الكهربائية للمقاومة بالهبوط الفولطي خلالها مقسوما على التيار المتدفق خلالها وتُقاس بوحدة الأوم (اختصارا Ω). المقاومة التي لها بضعة أومات من المقاومة هي تقريبا موصلة جيدة بينما المقاومة التي لها بضعة مليون من المقاومة هي تقريبا عازل. وضع الحرف k أمام الرمز Ω يعني ألفاً (kΩ أو كيلو أوم)، ووضع الحرف M أمام الرمز Ω يعني مليوناً (MΩ أو ميغا أوم). فهكذا المقاومة 100kΩ لها مقاومة 100,000Ω والمقاومة 10MΩ لها مقاومة 10,000,000Ω. تُعلّم مقاومة المقاومة على جسمها الاسطواني، غالبا على هيئة أشرطة ملونة. تُمثّل عشرة ألوان مختلفة الخانات من 0 إلى 9، إضافة إلى العديد من قوى العشرة، بحيث المقاومة التي لها شريط بني (1) وأسود (0) وأحمر (×100) هي مقاومة 1000Ω.



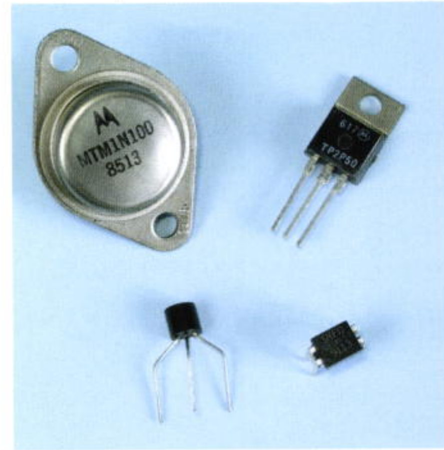
شكل ٢,٢,١٢: (أ) المقاومة هي سلكان بينهما موصّل للكهرباء غير مثالي. (ب) من المعتاد أن تُغلّف المقاومة في غطاء اسطواني، بأشرطة ملوّنة تحدد مقاومتها. (ج) في الرسم التخطيطي لجهاز إلكتروني، تُمثّل المقاومة بخط متعرّج.

تحقق من فهمك #٢: إهدار للطاقة

(للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

ينتج مذياعك صوتا عندما يسمح مضخمه لتيار من مزوّد طاقته أن يتدفق خلال سمّاعاته. أثناء لحظة هادئة، يرسل المضخم تيارا صغيرا فقط خلال السمّاعات وهذا التيار يواجه هبوطاً فولطياً صغيراً فقط. هكذا يحافظ التيار على معظم قدرته الكهربائية. كيف يمكن للمذياع أن يستخدم قدرة التيار المُتبقية قبل إعادتها لمزوّد الطاقة لإعادة استخدامها؟

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٣,٢,١٢: يجعل هذا الموسفت (MOSFET) من الممكن لشحنات كهربائية صغيرة أن تتحكم بتيارات كهربائية كبيرة. يمكن للترانزستورات الكبيرة أن تتحمّل المزيد من القدرة الكهربائية والقدرة الحرارية دون زيادة في التسخين.

الترانزستورات

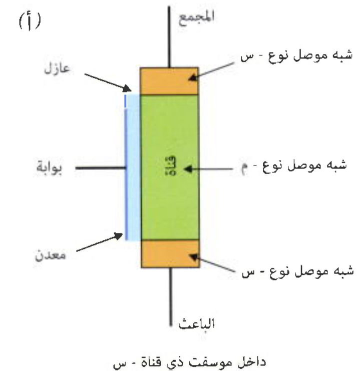
أُخترع الترانزستور في عام ١٩٤٨م من قِبل ثلاثة فيزيائيين أمريكيين هم وليام شوكلي (١٩١٠ - ١٩٨٩م) وجون باردين (١٩٠٨ - ١٩٩١م) ووالتر براتين (١٩٠٢ - ١٩٨٧م). الترانزستورات (شكل ٣,٢,١٢) هي العناصر الأساسية في جميع الأدوات الإلكترونية الحديثة تقريباً. مثل الدايودات، تُبنى الترانزستورات من أشباه الموصلات المطعّمة - أشباه موصلات مثل السيليكون والتي يُضاف إليها شوائب كيميائية. لكن على خلاف الدايودات، والتي ببساطة تمنع التيار من التدفق عكسيا خلال دائرة واحدة، فإن الترانزستورات تسمح للتيار في دائرة أن يتحكّم بالتيار في دائرة أخرى.

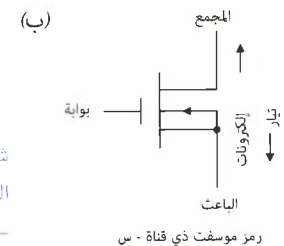
في حين هناك العديد من أنواع الترانزستورات، إلا أن أبسط أنواعها وأكثرها أهمية هو الترانزستور الحقلي. في الواقع، حتى في هذا النوع هناك تشكيلات عديدة، فسنركز على أكثرها شيوعا في الاستخدام في المشغّلات الصوتية، وأجهزة الفيديو، والكمبيوترات: وهو الترانزستور الحقلي أكسيد - المعدن - شبه الموصّل ذو قناة - س أو الموسفت ذو قناة - س (n- channel MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor). على الرغم من اسمه المعقّد، إلا أن الموسفت ذا قناة - س هو جهاز بسيط نسبيا، يحتوي أساساً على ثلاث طبقات شبه موصّلة وسطح معدني قريب (شكل ٤,٢,١٢). تُسمّى الطبقات الثلاثة المجمّع، والقناة والباعث، بينما يُسمّى السطح المعدني البوابة.

يحتوي المجمّع والباعث على شبه موصّل نوع - س مُطعّم بكثافة (العديد من إلكترونات مستوى التوصيل) وتحتوي القناة بينهما على شبه موصّل نوع - م مطعّم بشكل خفيف (بضعة مستويات تكافؤ فارغة). عندما تتلامس تلك الطبقات الثلاثة، تُشكّل وصلتين ثنائيتين م - س ظهرا إلى ظهر، فتتدفق إلكترونات مستوى التوصيل من المجمّع والباعث إلى داخل القناة لتملأ مستويات تكافئها الفارغة (شكل ٥,٢,١٢ أ). هكذا يظل الترانزستور الكامل بمنطقة نضوب عريضة - منطقة خالية من مستويات تكافؤ فارغة أو مستويات توصيل مشغولة - تمتد على طول الطريق من مجمّعه إلى باعثه. بعدم وجود أي شيء لنقل الشحنة خلال قناته، لا يمكن للترانزستور أن يوصّل تيارا بين مجمّعه وباعثه.

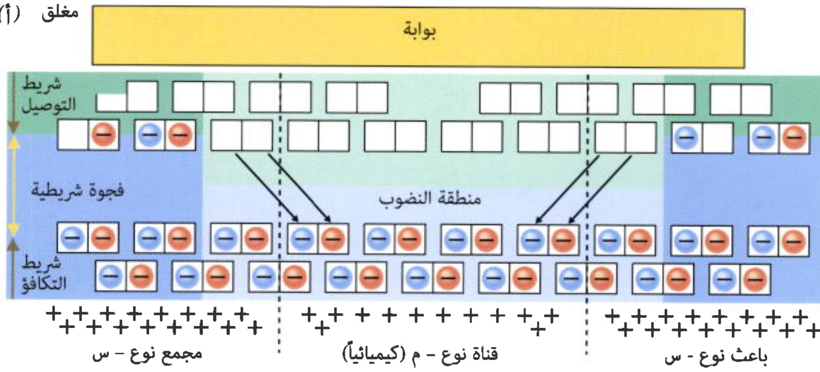
ولكن إذا كان بالإمكان إجبار إلكترونات أكثر للدخول إلى القناة بطريقة ما، فإن تلك الإلكترونات ستضطر أن تذهب لمستويات توصيل القناة فستتصرف القناة عندها كشبه موصّل نوع - س. بوجود قناة نوع - س محصورة بين مجمّع نوع - س وباعث نوع - س، فإن الوصلة م - س ستختفي وكذلك منطقة النضوب. في الواقع، ستصبح الثلاث طبقات قطعة واحدة من شبه الموصّل نوع - س وعندها يصبح الترانزستور قادرا على توصيل تيار بين مجمّعه وباعثه.

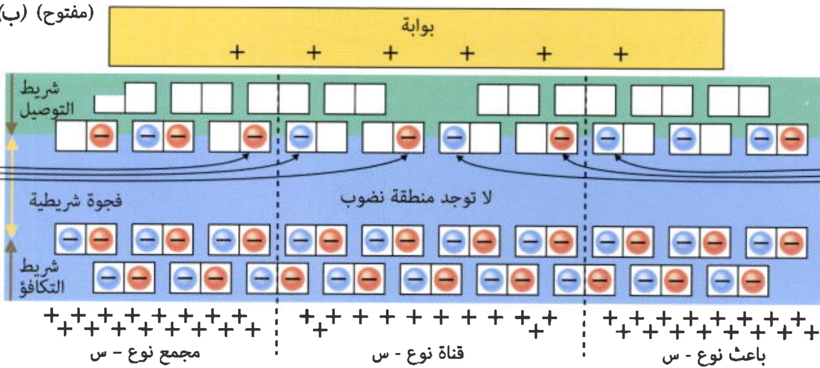
إن سحب إلكترونات إضافية إلى القناة من خارج الترانزستور هو مهمة البوابة المعدنية. تنفصل البوابة عن القناة بطبقة عازلة رقيقة بشكل عجيب، وتتحكم في مقدرة القناة على حمل تيار. عند وضع شحنة موجبة صغيرة جدا على البوابة من خلال سلك، فإنها تجذب إلكترونات إلى مستويات توصيل القناة ويبدأ الترانزستور بتوصيل التيار (شكل ٥,٢,١٢ ب). كلما زادت الشحنة الموجبة على البوابة، زاد عدد الإلكترونات التي تدخل القناة وزاد التيار المتدفق خلال الترانزستور. في الواقع، يتصرف الترانزستور كمقاومة متغيّرة بمقاومة تقل كلما زادت الشحنة الموجبة على بوابتها.





شكل ٤,٢,١٢: (أ) في الموسفت (MOSFET) ذي قناة - س، تكون القناة عادة منطقة نضوب لا يمكن أن تحمل تيارا بين الباعث والمجمّع. لكن عندما تجذب الشحنات الموجبة في البوابة إلكترونات إلى داخل القناة، تصبح القناة شبه موصّل نوع - س وتسمح للتيار بالتدفق. (ب) الرمز الممثل لموسفت ذي قناة - س في الرسم التخطيطي.





شكل ١٢،٢،٥: (أ) عندما يتشكّل موسفت ذو قناة – س، تملأ إلكترونات مستويات التوصيل من الباعث والمجمّع نوعي – س مستويات التكافؤ الفارغة في القناة ذات نوع – م فتُشكّل طبقة نضوب عريضة وعازلة. (ب) لكن عند وضع شحنة موجبة على البوابة المجاورة، فإنها تجذب إلكترونات من خارج الموسفت إلى داخل مستويات توصيل القناة وتحوّل البناء بأكمله إلى شبه موصّل نوع – س يوصل التيار.

يمكننا الآن فهم اسم الموسفت ذي قناة – س. تشير «القناة – س» لسلوك القناة ذي نوع – س عندما تكون بوابتها مشحونة إيجابيا ويمكن للترانزستور أن يحمل تيارا. على الرغم من أن القناة كيميائيا من نوع – م، إلا أنها تصبح نوع – س كهربائيا عندما تنجذب إلكترونات إضافية إليها وتكتسب محصلة شحنة سالبة. يشير «أكسيد – معدن – شبه موصّل» إلى أن البوابة المعدنية منفصلة عن قناة شبه موصّل بطبقة رقيقة عازلة من الأكسيد. يُثقب هذا العازل بسهولة مؤرقة، ولهذا يمكن للعديد من الأجهزة الإلكترونية أن تتلف بالكهرباء الساكنة. يشير «الترانزستور الحقلي» إلى أن المجال الكهربائي من الشحنة على البوابة هو ما يجذب الإلكترونات إلى القناة ويتحكّم في تدفق التيار خلال الترانزستور.

تحقق من فهمك # ٣: القدرة والتحكّم (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

يسمح تعريض القناة في موسفت ذي قناة – س للقناة بتحمّل المزيد من التيار بين باعثه ومجمّعه. لكن يحتاج الترانزستور المُكبّر إلى المزيد من الشحنة الموجبة على بوابته للتحكّم بذلك التيار. فسّر ذلك.

تخزين المعلومات الصوتية الرقمية

المشغّل الصوتي هو نصف كمبيوتر ونصف نظام استريو. فهو يخزّن ويُعالج المعلومات الصوتية بهيئة رقمية مثل الكمبيوتر لكنه بعد ذلك يضخّم تلك المعلومات لسمّاعات الرأس على هيئة تناظرية مثل نظام الاستريو. سوف نُحاكي ذلك التسلسل عند فحص إلكترونيات المشغّل: سنبدأ بذاكرته الرقمية وأنظمة معالجته وننتهي مع مضخّمه الصوتي.

داخل الجزء الرقمي في المشغّل الصوتي، تُمثّل قياسات ضغط الهواء وأعداد أخرى وفق نظام العدّ الثنائي. يحدّد مقدار كبر هذه الأعداد أو دقتها عدد الخانات الثنائية المطلوبة لتمثيلها. تُسمّى كل خانة ثنائية بالبت (bit)، واستخدام المزيد من البت يسمح لك بتمثيل أعداد أكبر أو أكثر دقة. عموما، كلما كانت المعلومات ذات تفاصيل أكثر، زادت البت المطلوبة لتمثيلها.

يمكن استخدام ثمانية بت لتمثيل أي رقم من ٠ (والذي هو 00000000) إلى ٢٥٥ (والذي هو 11111111). بما أن هناك أقل من 256 من أشياء كثيرة معتادة، فإن هذه الأشياء يمكن أن تُعرّف بمجموعات من ثمانية بت. على سبيل المثال، تم تخصيص أعداد بين 0 و 255 للرموز المستخدمة في النص الاعتيادي، حيث الحرف «A» مُعطى بالرقم 65. بما أن البت الثمانية 01000001 تُمثّل 65، فإنها أيضا تصف الحرف A. المجموعات من البت الثمانية شائعة جدا ومفيدة بحيث أعطيت اسماً خاصاً هو البايت.

في حين من الممكن تخزين معلومات صوتية باستخدام بايت واحد لكل قياس ضغط الهواء، إلا أن البايت الواحد لا يوفّر الدقة الكافية لإنتاج صوت عالي الجودة. في أكثر الأحوال، يُحفظ الصوت الرقمي باستخدام اثنين من البايت لكل قياس ضغط. تؤخذ قياسات الضغط هذه عشرات الآلاف من المرات كل ثانية، في العادة من ميكرفونات عديدة بشكل آني لكي توفّر صوت استريو أو الصوت المحيط. حتى عند استخدام تقنيات ضغط المعلومات المعقدة لإزالة المعلومات الفائضة أو غير المهمة، فإنه لا يزال يتطلب العديد من البت الكثيرة لتمثيل أسطوانة موسيقية. لذا، يحتاج المشغّل الصوتي ذاكرة كبيرة. هناك العديد من الطرق يمكن للمشغّل الصوتي، كما هو الحال في أي كمبيوتر، أن يخزّن بها البت. في ذاكرة تشغيله الرئيسية (غالبا تُسمّى ذاكرة الوصول العشوائي أو RAM)، كل بت هي مكثّف صغير جدا يستخدم وجود أو غياب شحنة كهربائية منفصلة لكي يرمز إلى 1 أو 0. يخزّن المشغّل البت بإنتاج أو إزالة شحنات منفصلة ويسترجع البت بالبحث عن تلك الشحنة.

يُبنى كل مكثّف عند نهاية الموسفت ذي قناة – س الخاص به. هذا الموسفت يتحكّم بتدفق الشحنة من وإلى المكثّف. لتخزين أو استرجاع البت، يضع المشغّل الصوتي شحنة موجبة على بوابة الموسفت بحيث يُصبح الموسفت موصلا كهربائيا. يمكن لنظام الذاكرة عندها أن ينقل الشحنة من وإلى مكثّف البت.

إن تخزين البت سهل نسبياً؛ ببساطة يرسل المشغّل الشحنة المناسبة إلى المكثّف خلال الموسفت. لكن استرجاع البت أصعب من ذلك لأن الشحنة على المكثّف صغيرة جدا. تستشعر المضخمات الحساسة في نظام الذاكرة أي شحنة تتدفق من المكثّف خلال الموسفت وتُعطي تقريرا لما وجدته إلى المشغّل الصوتي. بما أن عملية القراءة هذه تُزيل شحنة من المكثّف، فإن نظام الذاكرة يجب أن يُخزّن البت مرة أخرى مباشرة.

من المؤسف أنه لا يمكن لهذه المُكثّفات الصغيرة جدا أن تحمل الشحنة للأبد لأنها تتسرب للخارج نحو محيطها. تُسمّى الذاكرة التي تستخدم المكثّفات المشحونة لتخزين البت بالذاكرة الديناميكية ويجب أن تتجدد (تُقرأ ويُعاد تخزينها) مئات المرات كل ثانية لضمان أن الـ 1 لا ينقلب إلى 0 بالخطأ والعكس بالعكس.

الذاكرة الديناميكية هي أيضا سريعة الزوال – فتُفقد محتوياتها عند إطفاء المشغّل الصوتي. لكي يُحافظ المشغّل الصوتي على بطارياته، فإنه يُبقي معلوماته الموسيقية في ذاكرة غير زائلة – أي ذاكرة لا تحتاج كهرباء للمحافظة على معلوماتها. تظهر كل عام تقريبا إمكانيات جديدة لذاكرات غير زائلة، لكن في الوقت الحالي الأنواع الثلاثة المتقدمة هي ذاكرات الفلاش، والقرص المغنطيسي، والقرص الضوئي. سنُركّز هنا على ذاكرتي الفلاش والقرص المغنطيسي ونتعرض للذاكرة الضوئية في القسم ١٥-٢.

تشابه ذاكرة الفلاش الذاكرة الديناميكية من حيث أن كل بت تُخزّن كوجود أو غياب شحنة مرتبطة بموسفت. لكن في ذاكرة الفلاش، تسكن تلك الشحنة على بوابة الموسفت الطافية – بوابة ثانية غير متصلة تقع في الطبقة العازلة بين القناة والبوابة العادية. بما أن هذه البوابة الطافية محاطة بعازل، فإنه يمكنها أن تحتفظ بشحنتها لعشرات السنين. وطالما أن تلك الشحنة موجودة، فإنها ستحدد موصلية الموسفت وما إذا كانت البت 0 أو 1.

إن قراءة البت من ذاكرة الفلاش أمر سهل، لكن تخزينها يُعدّ تحديا. العزل ذاته الذي يحجز الشحنة على البوابة الطافية لسنوات يجعل من الصعب على تلك الشحنة أن تتغيّر. لإضافة أو إزالة إلكترونات من البوابة الطافية، يضع نظام الذاكرة

فولطيات عالية نسبيا على باعث ومجمّع وبوابة الموسفت العادية، وتسمح المجالات الكهربائية القوية الناتجة للإلكترونات بالعبور خلال العازل الذي يفصل القناة عن البوابة الطافية.

لإضافة إلكترونات إلى البوابة الطافية، تُرتّب المجالات الكهربائية بحيث تتسبب في تسارع إلكترونات القناة لسرعات عالية جدا فتخترق هذه الإلكترونات الطبقة العازلة إلى البوابة الطافية. ولإزالة إلكترونات من البوابة الطافية، تُرتّب المجالات الكهربائية بحيث تنحرف الموجات الموقوفة لإلكترونات البوابة الطافية إلى العازل. عندما تصل هذه الموجات المنحرفة إلى عمق كافٍ في العازل، فإن الإلكترونات تبدأ بالتسرب خلاله إلى القناة عن طريق عملية تُعرف بالنفقية الكمية. سنعود لاستكشاف النفقية الكمية في الفصل السادس عشر.

قراءة ذاكرة الفلاش سريعة لكن الكتابة عليها بطيئة نسبيا. علاوة على ذلك، تتسبب عملية اختراق الإلكترونات في تلف تراكمي للطبقة العازلة وتحُد من عدد المرات التي يمكن أن يكتب فيها على ذاكرة الفلاش. يستخدم المشغّل الصوتي مزيجاً من الذاكرة الديناميكية وذاكرة الفلاش: يقوم بالعمليات الحسابية في الذاكرة الديناميكية لكن يحفظ معلوماته طويلة الأجل في ذاكرة الفلاش.

ولكن هناك مفهوم ذاكرة آخر والذي يظل ذا كفاءة مادية أفضل من ذاكرة الفلاش لتخزين مقادير هائلة من المعلومات: هي ذاكرة القرص المغنطيسي. في الغالب تحتوي المشغّلات الصوتية التي تخزّن عشرات الآلاف من الأغاني على أقراص مغنطيسية. تُسمى هذه الأقراص أيضا الأقراص الصلبة، وتستخدم التأثيرات المغنطيسية التي درسناها في الفصل الحادي عشر لتخزين الموسيقى أو أي معلومات أخرى.

تماما مثل ما يمكن للشريط المغنطيسي في بطاقة الائتمان (شكل ٦,١,١١) أن يختزن معلومات عند مواضع أقطابه المغنطيسية، فإنه يمكن لسطح القرص المغنطيسي أن يُخزّن معلومات في اتجاهات أقطابه المغنطيسية. فالأقراص الصلبة الفعلية هي أسطوانات ملساء من الألومنيوم تم تغطيتها بمواد مغنطيسية صلبة ذات تقنية عالية. باستخدام مغنطيسات كهربائية مجهرية لكتابة أقطاب مغنطيسية واستخدام مستشعرات مغنطيسية شبه موصّلة معقدة لقراءتها، فإن الأقراص الصلبة الحديثة يمكنها أن تجمع تقريبا ربع مليون من البت في مليمتر مربع من السطح (حوالي 16 غيغابايت لكل بوصة مربعة). إن مجرد تحديد مواقع هذه البت المجهرية على أسطوانات تدور فوق 100 مرة في الثانية هو عمل كهروميكانيكي مبهر، ومع ذلك تقوم هذه الأقراص به بشكل دوري حتى عندما تركض ومعك مشغّلك الصوتي.

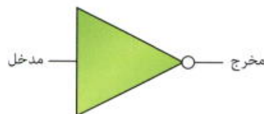
تحقق من فهمك # ٤: مثل إرسال رسالة لنفسك (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

في كل بضعة جزء من ألف من الثانية، يتوقف نظام ذاكرة الكمبيوتر لوهلة لقراءة ثم إعادة كتابة كل بت في ذاكرته الديناميكية. لماذا يحدث ذلك؟

كمبيوتر المشغّل الصوتي

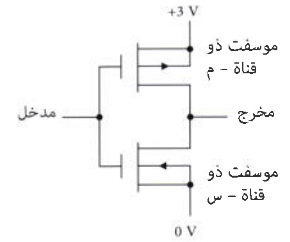
لقد رأينا كيف يمكن أن تُمثّل وتُخزّن المعلومات الصوتية على هيئة بت، فالآن دعنا ننظر كيف يعمل كمبيوتر المشغّل الصوتي مع هذه البت. تُنفّذ هذه المعالجة الرقمية بأجهزة إلكترونية تأخذ مجموعات من البت كمدخل وتُنتج مجموعات جديدة من البت كمخرج لها. بما أن البت الخارجة لها علاقة بالبت الداخلة وفق قوانين منطقية، فإن هذه الأجهزة الإلكترونية تُسمى عناصر منطقية.

أبسط العناصر المنطقية هو العاكس، والذي له بت واحدة مُدخل وبت واحدة مُخرج. مُخرجه هو عكس مُدخله (شكل ٦,٢,١٢). إذا كانت البت المُدخلة في العاكس هي 1، فإن البت المُخرجة هي 0 والعكس بالعكس. تُستخدم العاكسات لعكس عملية – فتح الضوء بدلا من غلقه أو بدء أغنية بدلا من إيقافها.



مدخل	مخرج
1	0
0	1

شكل ٦,٢,١٢: يُنتج العاكس، الموضح هنا تخطيطيا، بت واحدة في المخرج والتي هي عكس البت الواحدة الداخلة.



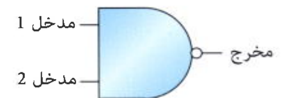
شكل ٧,٢,١٢: عندما تصل شحنة سالبة عند مدخل عاكس السيموس CMOS، فإن الموسفت ذا قناة - م (أعلى) يسمح للشحنة الموجبة بالتدفق إلى المُخرج. عندما تصل شحنة موجبة عند المدخل، فإن الموسفت ذا قناة - س (أسفل) يرسل شحنات سالبة إلى المخرج.

تُستخدم العاكسات أيضا كجزء من عناصر منطقية أكثر تعقيدا.

لكن العاكسات ليست مجرد عناصر منطقية مجرّدة؛ إنها أجهزة إلكترونية حقيقية. فهي تعمل على مدخلات كهربائية وتُنشئ مخرجات كهربائية. في كمبيوتر المشغّل الصوتي، تمثّل العاكسات والعناصر المنطقية الأخرى البت الداخلة والخارجة بشحنات كهربائية. تُمثّل الشحنة الموجبة بـ ١ والشحنة السالبة بـ ٠. هكذا عندما تصل الشحنة الموجبة لمدخل العاكس، فإن العاكس يُحرّر شحنة سالبة من مخرجه.

في العادة تُبنى العاكسات والعناصر المنطقية الأخرى من كل من موسفت ذي قناة - س وموسفت ذي قناة - م. لقد سبق أن رأينا أن الموسفت ذا قناة - س يوصل التيار فقط عندما تكون بوابته مشحونة بشحنة موجبة. الموسفت ذو قناة - م ما هو إلا العكس، فيوصل التيار فقط عندما تكون بوابته مشحونة بشحنة سالبة. يُصنع مجمّع وباعث الموسفت ذي قناة - م من شبه موصّل نوع - م بينما تُصنع القناة من شبه موصّل نوع - س. بما أن الموسفت ذا قناة - س والموسفت ذا قناة - م هما مكمّلان لبعضهما البعض، فإن العناصر المنطقية المبنية منهما تُسمّى عناصر موسفت مكمّلة أو عناصر سيموس CMOS. يُصنع كمبيوتر المشغّل الصوتي بأكمله تقريبا من عناصر سيموس.

يحتوي عاكس سيموس من موسفت واحد ذي قناة - س وموسفت واحد ذي قناة - م (شكل ٧,٢,١٢). يتصل الموسفت ذو قناة - س بالطرف السالب لمزوّد طاقة الكمبيوتر ويتحكّم بتدفق الشحنة السالبة إلى مخرج العاكس. ويتصل الموسفت ذو قناة - م بالطرف الموجب لمزوّد الطاقة ويتحكّم بتدفق الشحنة الموجبة إلى المخرج. عندما تصل الشحنة السالبة لمدخل العاكس وتتحرك إلى بوابات الموسفت، فالموسفت ذو قناة - م هو الذي يوصّل التيار فقط ويصبح المخرج مشحونا إيجابيا. وعندما تصل الشحنة الموجبة للمدخل، فالموسفت ذو قناة - س هو الذي يوصل التيار فقط ويصبح المخرج مشحونا سلبيا.



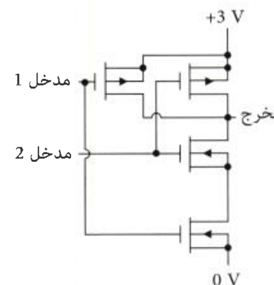
مدخل 1	مدخل 2	مخرج
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

شكل ٨,٢,١٢: البت المُخرجة من بوابة Not-AND أو NAND، الموضحة هنا تخطيطيا، هي ١ إلا إذا كانت كلتا البت في المدخلين هما ١.

ولكن يحتاج الكمبيوتر لعناصر منطقية أكثر تعقيدا من العاكسات. أحد هذه العناصر هو بوابة الـ Not-AND أو NAND. هذا العنصر المنطقي له اثنان من البت داخلة ومخرج بت واحدة، والبت الخارجة هي ١ إلا إذا كان كلا البت الداخلين ١ (شكل ٨,٢,١٢). يُسمّى هذا العنصر المنطقي ببوابة Not-AND لأنه عكس بوابة AND. تُنتج بوابة AND مخرج ٠ ما لم يكن كلا البت الداخلين ١. تُسمّى في الغالب العناصر المنطقية البسيطة الخالية من الذاكرة ببوابات.

تستخدم بوابة NAND في سيموس اثنين من الموسفت ذي قناة - س واثنين من الموسفت ذي قناة - م (شكل ١٢,٢,٩). يُرتّب اثنان من الموسفت ذو قناة - س على التسلسل - واحدا بعد الآخر - بحيث أن التيار المار خلال أحدهما يجب أن يمرّ أيضا خلال الآخر. إذا حمل أي من الترانزستورين شحنة سالبة على بوابته، فإنه لا يمكن لأي تيار أن يتدفق خلال السلسلة. تحمل العناصر المرتبة على التسلسل التيار نفسه، لكنها قد تواجه هبوطاً فولطياً مختلفاً.

يُرتب اثنان من الموسفت ذو قناة - م على التوازي - أحدهما بجانب الآخر - بحيث يمكن للتيار أن يتدفق خلال أيّ منهما نحو المخرج. إذا كان لأي من الترانزستورين شحنة سالبة على بوابته، فإن التيار يمكنه أن



شكل ٩,٢,١٢: بوابة NAND في سيموس لها اثنتان من البت مُدخلة. عندما تصل شحنة سالبة خلال أي من المدخلين، فإن سلسلة الموسفت ذي قناة - س (أسفل) تتوقف عن توصيل التيار ويسمح أحد الموسفت ذي قناة - م (أعلى) للشحنة الموجبة بأن تصل للمخرج. فقط إذا كان كلا المدخلين مشحونين إيجابيا ستصل الشحنة السالبة إلى المخرج.

يتدفق من أحد جانبي الزوجين إلى الآخر. تتشارك العناصر المرتبة على التوازي في التيار الذي تستقبله خلال أحد الأسلاك وتوصلها سويّة إلى السلك الآخر. لكن في حين العناصر المتوازية قد تتشارك في التيار بشكل غير متساوٍ بينهما، إلا أن جميعها تواجه نفس الهبوط الفولطي.

التوصيل على التوازي والتوالي

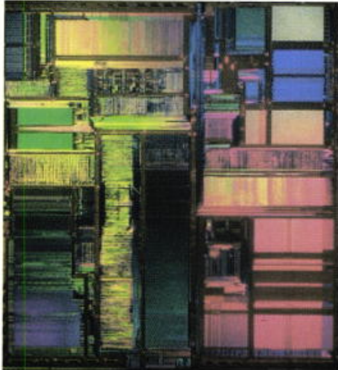
التوصيل على التوالي:
تحمل جميع العناصر الموصلة على التوالي، أحدها تلو الآخر بحيث تشكل سلسلة، التيار نفسه لكن يمكن أن يكون لها هبوط فولطي مختلف. الهبوط الفولطي الكلي من بداية السلسلة إلى نهايتها هو مجموع الهبوطات الفولطية المنفردة خلال العناصر.

التوصيل على التوازي:
جميع العناصر الموصلة على التوازي، أحدها بجنب الآخر بحيث يتصل جميعها بزوج الأسلاك نفسه، لها نفس الهبوط الفولطي لكن يمكنها أن تحمل تيارات مختلفة. مجموع التيار المتدفق بين هذين السلكين هو مجموع التيارات المنفردة خلال العناصر.

إذا وصلت شحنة سالبة إلى أي من مدخلي بوابة NAND في السيموس، فإن سلسلة الموسفت ذي القناة - س ستكون غير موصّلة وسيوصل أحد الموسفت ذي القناة - م شحنة موجبة إلى المخرج. لكن إذا وصلت شحنة موجبة عند كلا المدخلين، فإن كلا الموسفت ذي القناة - م سيكونان غير موصلين وستوصّل سلسلة الموسفت ذي قناة - س شحنة سالبة إلى المخرج. وهكذا يكون لبوابة NAND في السيموس السلوك المنطقي السليم.

يمكن دمج هذين العنصرين المنطقيين، العاكسات وبوابات NAND، لإنتاج أي عنصر منطقي يمكن تخيله. على سبيل المثال، يمكن استخدامها لبناء آلة جمع، وهي جهاز يجمع الأعداد الداخلة له على هيئة مجموعتين من البت ليُنتج مجموعة من البت الخارجة والتي تمثّل المجموع. يمكن استخدام آلات الجمع ذاتها لبناء آلات ضرب، ويمكن استخدام آلات الضرب لبناء أجهزة أكثر تعقيدا. بهذه الطريقة، يمكن استخدام أبسط العناصر المنطقية لبناء كمبيوتر متكامل.

بإذن مؤسسة إينتل



شكل ١٠,٢,١٢: توضح هذه الصورة الفوتوغرافية المجهرية دائرة متكاملة لمعالج صغير - تقريبا كمبيوتر على شريحة. تصل أشرطة من الألومنيوم بين ملايين من الموسفت ومكوّنات أخرى تم تشكيلها بتقنيات تصويرية على سطح رقاقة رقيقة من السيليكون.

في الحقيقة، لا يُبنى الكمبيوتر من بوابات NAND وعاكسات فقط. لتطوير سرعته وتقليص حجمه، يستخدم الكمبيوتر بعض العناصر المنطقية الأخرى أيضا. مثل العاكس وبوابة NAND في السيموس، فإن هذه العناصر مبنية مباشرة من عدد من الموسفت ذوات القناة - س وقناة - م.

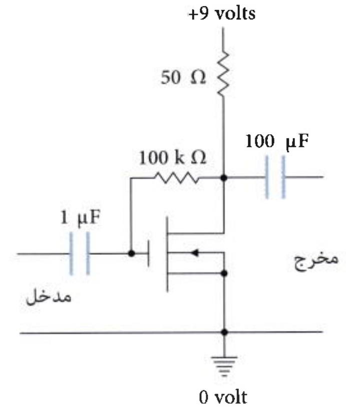
جميع هذه العناصر المنطقية متصلة سوية ببعضها عن طريق أسلاك في مخطط معقّد لكي تكوّن كمبيوتراً متكاملاً (شكل ١٠,٢,١٢). في المشغّل الصوتي، يسترجع وينظم هذا الكمبيوتر المعلومات الصوتية ويُعدّها للإلكترونيات السمعية، والتي ليست رقمية. عمل الكمبيوتر الأخير هو توصيل معلومات الموسيقى الرقمية، أي قياسات ضغط الهواء، إلى محوّل رقمي-إلى-تناظري (DAC). هذا الجهاز الإلكتروني هو السطح الفاصل بين تمثيلي المعلومات، الرقمي والتناظري. تغادر المعلومات الموسيقية المحوّل الرقمي-إلى-التناظري على هيئة فولطية تتناسب مع ضغط الهواء. هذه الفولطية هي المدخل للمكوّن الأساسي التناظري للمشغّل الصوتي: مضخمه الصوتي. في الواقع، للمشغّل نظامان سمعيان تناظريان متكاملان حتى يستطيع أن يُنتج صوت الاستريو. لكن بما أن هذين النظامين متماثلان، سنُركّز فقط على أحدهما.

تحقق من فهمك # ٥: جمعها سوية (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

كيف يمكنك أن تستخدم عاكسات وبوابات NAND لإنشاء بوابة AND، وهي عنصر منطقي له مدخلان ومخرج واحد، يكون المخرج 1 فقط إذا كان كلا المدخلين 1 أيضا؟

المضخم الصوتي للمشغّل الصوتي

تُسمّى التذبذبات في الفولطية والتي يوفرها المحوّل الرقمي-إلى-التناظري للمشغّل الصوتي بالإشارة الصوتية لأنها تُمثّل معلومة صوتية. تُسمّى العديد من تمثيلات المعلومات التناظرية أو الرقمية بالإشارات، بما في ذلك إشارات الفيديو، وإشارات البيانات، وحتى إشارات الالتفاف.

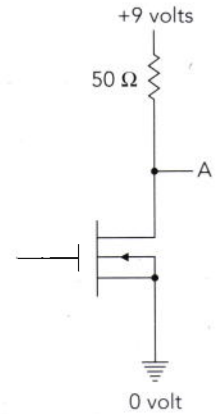


شكل ١١,٢,١٢: يمكن بناء مضخّم صوتي بسيط بموسفت واحد ذي قناة - س، ومقاومتين، ومكثّفين. يُشغّل هذا الجهاز بطارية مقدارها 9V.

لكن في حين تحتوي إشارة المشغّل الصوتي على جميع المعلومات المطلوبة لإعادة إنتاج الصوت الأصلي، على هيئة تناظرية ملائمة، إلا أنه ليس لديها القدرة التي تحتاجها سمّاعات الرأس لإنتاج ذلك الصوت بارتفاع صوتي معقول. يجب أن يُكبّر شيء هذه الإشارة الصوتية أولا؛ تحتاج أن تتضخم.

تُعرف الأجهزة التي تُكبّر الخصائص المتعددة للإشارات بالمضخمات. المضخم الصوتي هو مضخم صُمم لتقوية الإشارات في مدى التردد الذي نسمعه أو نشعر به (20Hz إلى 20,000Hz). للمضخم دائرتان منفصلتان - دائرة إدخال ودائرة إخراج - ويستخدم التيار الصغير المار في دائرة إدخاله للتحكّم بتيار أكبر بكثير يمر خلال دائرة إخراجه. بهذه الطريقة، يوفّر المضخّم قدرة أكبر لدائرة إخراجه مقارنة بما يستقبلها من دائرة إدخاله. يوضح الشكل (١١,٢,١٢) رسما تخطيطيا لمضخّم صوتي بسيط مبني من العناصر التي درسناها للتو. لهذا المضخّم خمسة عناصر فقط: موسفت ذو قناة - س، ومقاومتان، ومكثّفان. يسحب المضخّم الكهرباء من بطارية 9 V (أو معدل كهربائي مكافئ) ويُضخّم تيارا مترددا صغيرا جدا في دائرة إدخاله ليُصبح تيارا مترددا كبيرا في دائرة إخراجه.

لفهم كيفية عمل هذا المضخّم، دعنا نُزيل أولا كل شيء عدا الموسفت والمقاومة ذي 50Ω (شكل ١٢,٢,١٢). هذان المكونان موصلان على التوالي، فأي تيار يمر خلال أحدها يجب أن يمر خلال الآخر أيضاً. عندما لا يوصّل الموسفت التيار، فلن يتدفق أي تيار خلال المقاومة 50Ω ولن تواجه أي هبوط فولطي. فهكذا الفولطية عند النقطة أ هي 9V. لكن إذا وصّل الترانزستور تيارا، فإنه سيظهر هبوط فولطي خلال المقاومة 50Ω وستتناقص الفولطية عند النقطة أ.



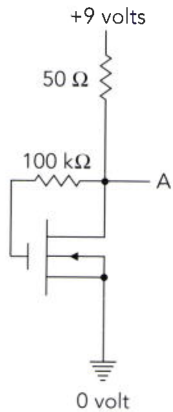
شكل ١٢,٢,١٢: تعتمد الفولطية عند النقطة أ على مقاومة الموسفت. يمثّل المثلث المخطط في أسفل الشكل التوصيل الأرضي (عادة الأرض ذاتها).

سيوصّل الترانزستور تيارا فقط إذا وضعت شحنة موجبة على بوابته. يمكن القيام بذلك بوصل البوابة بالنقطة أ بواسطة مقاومة مقدارها 100kΩ (شكل ١٣,٢,١٢). بما أن الفولطية عند النقطة أ هي 9V، فإنها مشحونة إيجابيا وتدفع الشحنة باتجاه أي شيء ذي فولطية أقل. يتدفق التيار ببطء خلال المقاومة من أ إلى البوابة. لكن حينما تتجمّع الشحنة الموجبة على البوابة، يبدأ الترانزستور بتوصيل التيار وتهبط الفولطية عند أ. عندما تصل الفولطية عند أ لنفس الفولطية على البوابة، يتوقف التيار عن التدفق خلال المقاومة.

عندها يكون المضخّم في وضع اتزان مستقر؛ النقطة أ لها فولطية مقدارها 5V تقريبا وبوابة الترانزستور عليها مقدار متواضع من الشحنة. توفّر المقاومة 100 kΩ للترانزستور تغذية راجعة، أي توفر للترانزستور معلومات حول الوضع الحالي عند النقطة أ والتي يمكن أن يستخدمها الترانزستور لتعديل أو تطوير تلك الحالة. على الرغم من أن التغذية الراجعة تتباطأ بواسطة المقاومة الكبيرة للمقاومة، إلا أنها تعمل دوما على إعادة الفولطية عند النقطة أ لمقدارها الاتزاني. إذا وصّل الترانزستور تيارا صغيرا جدا، فإن الشحنة تتدفق على بوابته وتجعله يزيد في التوصيل. إذا وصّل الترانزستور تيارا كبيرا، فإن الشحنة تتدفق من على بوابته وتجعله يقل في التوصيل.
المضخّم الآن شديد الحساسية للتغييرات الطفيفة في الشحنة على بوابة الترانزستور. إذا أضفت كمية صغيرة جدا من الشحنة الموجبة للبوابة، ستهبط الفولطية عند النقطة أ. إذا أزلت كمية صغيرة من الشحنة من البوابة، سترتفع الفولطية عند النقطة أ. على الرغم من محاولة التيار في مقاومة التغذية الراجعة لإبطال هذه التغيرات، إلا أنها تعمل بشكل بطيء لمعارضة التغيرات القصيرة على مقياس الزمن. تنجح إشارة الإدخال

للمضخّم في إضافة أو إزالة شحنة موجبة من البوابة وتخرج إشارة إخراج من النقطة أ.

للمضخّم سلكان للإدخال. يتدفق تيار إشارة صوتية تناظرية إلى المضخّم خلال أحد السلكين ويعود من خلال الآخر. لكن الإشارة الصوتية ليست متصلة مباشرة بالبوابة. بدلا من ذلك، تكون متصلة بالبوابة من خلال مكثّف (شكل ١٤،٢،١٢). بالإضافة لتخزين الشحنة والطاقة، يمكن للمكثّف أن ينقل تياراً بين سلكين لهما فولطيتان مختلفتان. تُعدّ مثل هذه المرونة في الفولطية أمراً مهما في المضخّمات الصوتية التي تعمل بالبطاريات والتي يجب أن تقوم بعملية تضخيمها بفولطيات موجبة فقط. بمساعدة مكثّفات إدخال وإخراج، يمكن لمضخّمنا الصوتي أن يكون له فولطية تشغيل متوسطة مقدارها حوالي 5V+ بينما يكون له متوسط فولطية إدخال وإخراج مقداره 0V.



شكل ١٣،٢،١٢: تنقل المقاومة 100 kΩ شحنة موجبة إلى البوابة إلى أن تهبط الفولطية عند النقطة أ إلى 5V تقريباً.

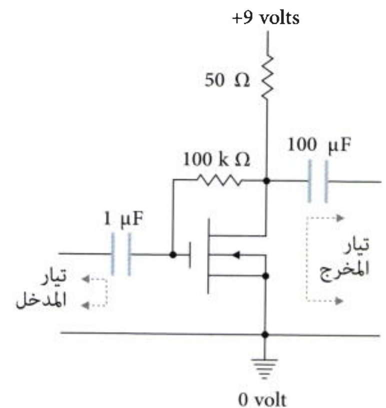
لرؤية كيف يُمرّر المكثّف التيار، دعنا نشاهد تدفق التيار الداخل إلى اليمين، إلى مكثّف المدخل في مضخّمنا. بينما تتراكم شحنة ذلك التيار الموجبة على اللوح الأيسر للمكثّف، فإنها تجذب الشحنة السالبة على اللوح الأيمن للمكثّف وبعيدا عن البوابة. يظل المكثّف متعادلا كهربائيا لكن تُصبح البوابة مشحونا إيجابيا أكثر. إجمالا، يكون المكثف قد نقل تياراً داخلاً إلى البوابة، بالرغم من أنه لم تمر في الحقيقة أي شحنة خلال طبقته العازلة وتظل لوحتاه عند فولطيات مختلفة.

بمساعدة مكثّف المدخل، ينتج التيار الداخل المتذبذب في المضخّم شحنة متذبذبة على بوابة الترانزستور ونتيجة لذلك تتذبذب الفولطية عند النقطة أ. حتى التيار الصغير جدا المتذبذب في سلكيْ الإدخال يُنشئ فولطية متذبذبة كبيرة عند النقطة أ.

شكل ١٤،٢،١٢: بما أن التيار المتدفق ذهابا وإيابا خلال سلكيْ الإدخال يؤثر على الشحنة التي على بوابة الترانزستور، فإنه يؤثر أيضا على الفولطية عند النقطة أ.

هذه الفولطية المتذبذبة مسؤولة عن إرسال تيار متذبذب خلال سمّاعات الرأس. على الرغم من أن سمّاعات الرأس ليست أجهزة أومية في الحقيقة، إلا أنها تستجيب للفولطيات المتذبذبة عن طريق حمل تيارات متذبذبة. بوضع هبوط فولطي متذبذب عبر سلكيْ سمّاعات الرأس، يمكن للمضخّم أن يتسبب في حملها لتيار متذبذب وإنتاج تذبذبات ضغطية وصوت مقابل ذلك.

لكن الفولطية عند النقطة أ هي حوالي 5V، بينما تتوقع سمّاعات الرأس هبوطاً فولطياً متوسطاً مقداره 0V. لنقل الفولطيات والتيارات المتذبذبة من النقطة أ إلى سمّاعات الرأس، مع إلغاء فرقهما الفولطي الكبير، يصل مضخّمنا بينهما عن طريق مكثّف إخراج (شكل ١٥،٢،١٢). كالسابق، تقابل التذبذبات في التيار والفولطية على اللوح الأيسر لمكثّف الإخراج تذبذبات في التيار والفولطية على لوحه الأيمن. بالرغم من أن المضخّم يعمل بفولطية متوسطة عالية، فإن إشارة الإخراج لسمّاعات الرأس لها فولطية متوسطة مقدارها 0V.



شكل ١٥،٢،١٢: يتسبب المضخّم في تدفق تيارات ذهابا وإيابا خلال سلكيْ الإخراج. التيار المتردد في سلكيْ الإخراج هو صورة طبق الأصل من التيار المتردد في سلكيْ الإدخال، لكن أكبر منه.

تُنتج التيارات المتذبذبة الصغيرة جدا في دائرة الإدخال لمضخّمنا تيارات متذبذبة كبيرة في دائرة إخراجه. يعمل هذا المضخّم بشكل جيد جدا بالرغم من بساطته. إذا وصلت ميكروفوناً بسلكيْ الإدخال وسمّاعات رأس بسلكيْ الإخراج، فإن السمّاعات ستقوم بعمل مدهش بإعادة إنتاج الصوت الذي في الميكروفون.

لكن مضخّمنا البسيط ليس مثالياً. فهو يشوّه الصوت نوعا ما ولا يتعامل مع ترددات أو سعات الصوت بشكل متساوٍ. وهو أيضا يُهدر مقداراً كبيراً من القدرة الكهربائية في تسخين المقاومة ذات 50Ω. تُعدّل المضخّمات في المشغّلات الصوتية هذه المشاكل بعناية. يستخدم معظمها التغذية الراجعة لضمان أن إشارات إخراجها هي صور طبق الأصل تماما من إشارات إدخالها، لكن أكبر. فهي تستشعر قصورها وتُعدّله.

ولكن النسخة المثالية من إشارة الإدخال ليست دائماً هي المُحبّذ. بعض الأحيان تودّ أن تزيد من ارتفاع جزء من الصوت. تسمح لك مفاتيح التحكّم بالطبقة العالية والطبقة المنخفضة في المشغّل الصوتي بأن تغير باختيارك ارتفاع أجزاء التردد العالي والمنخفض في الصوت، على التوالي.

في العادة يتم تصنيف المضخّم وفقا لقمة القدرة التي يمكن أن يوفّرها لسمّاعات الرأس (أو السمّاعات) ويجب أن لا تصل أبدا قدرته المتوسطة لذلك المقدار. لكن يمكن للمضخّم أن يصل لقمة قدرته أثناء مقطع ليس مرتفعا بشكل كبير. ذلك لأنه كثيراً ما تتداخل الموجات الصوتية مع بعضها البعض (انظر قسم ٩-٣ لمراجعة تداخل الموجات) ومتى ما تطابقت قممها وقيعانها عند الميكروفون، فإن التداخل البنّاء يمكن أن يُنتج للحظة تذبذبات ضغطية هائلة. لإعادة إنتاج تلك الموجات المتراكبة بشكل جيّد، يجب أن يكون المضخّم الصوتي قادرا على توفير أضعاف قدرته المتوسطة، وإن كان للحظة. إذا لم يستطع المضخّم أن يوفّر ذلك المقدار من القدرة، فإن الإشارة الصوتية التي يُرسلها لسمّاعات الرأس أو السمّاعات ستكون مشوّهة وسيكون الصوت غير جميل. ولهذا فإن معظم محبّي الموسيقى يستخدمون مضخّمات ضخمة حتى عند استماعهم لموسيقى هادئة.

أما بالنسبة لسمّاعات الرأس ذاتها، فهي بالعموم تستخدم تأثيرات كهرومغنطيسية لتحريك سطح ذهابا وإيابا بشكل متزامن مع تذبذبات تيار المضخّم. في معظم الحالات، يُرسل تيار المضخّم خلال ملف سلكيْ مغمور في مجال مغنطيسي قويّ ومتصل بسطح متحرك. يواجه هذا التيار قوة لورنتز بسبب المجال المغنطيسي وتدفع تلك القوة التيار والملف والسطح ذهابا وإيابا بينما يتذبذب التيار. يضغط السطح المتحرك الهواء ويخلخله بشكل تبادلي، وبالتالي يُعيد إنتاج الصوت الأصلي.

تحقق من فهمك # ٦: التحكّم بالصوت (للإجابة، انظر صفحة ٤١٢)

عندما تصل ميكروفوناً بمدخل مضخّم أساسه موسفت، فإن الميكروفون يرسل تيارا ذهابا وإيابا خلال سلكيْ الإدخال. نتيجة لذلك، ما هو عنصر التحكّم المهم في المضخّم والذي تتحرك الشحنة نحوه وبعيداً عنه؟

خاتمة الفصل الثاني عشر

درسنا في هذا الفصل جهازين إلكترونيين لرؤية كيفية استخدامهما للكهرباء والمغنطيسية لأداء مهمات مفيدة. في قسم المعدلات الكهربائية، رأينا كيف يُجمّع محوّل، ودايودات ومكثّف في نظام يحصل على كهرباء من تيار متردد عالي الفولطية ويستخدمه لتوفير كهرباء ذات تيار مستمر وفولطية منخفضة. ورأينا كيف تُحدّد الفيزياء الكمية خصائص المعادن، والعوازل، وأشباه الموصلات، وتعلمنا كيف يُحدّ الدايود شبه الموصّل من تدفق التيار لاتجاه واحد فقط.
في قسم المشغّلات الصوتية، درسنا الطرق التي يمكن بها تمثيل المعلومات الصوتية ونظرنا في التقنيات الإلكترونية المستخدمة لتمثيل ذلك الصوت على هيئات رقمية وتناظرية. كما فحصنا العنصر الإلكتروني الحديث الأكثر أهمية: الترانزستور، وهو جهاز شبه موصّل يسمح للتيار في دائرة بالتحكّم بالتيار في دائرة أخرى. ورأينا كيف تستخدم المشغّلات الصوتية الترانزستورات وعناصر إلكترونية أخرى في كل من كمبيوتره الرقمي ومضخمه التناظري.

تفسير: بناء طقم أدوات إلكترونية

بناء على ما احتواه طقمك، فقد تكون قد عملت مع مقاومات، ومكثّفات، ودايودات، وترانزستورات. تحد المقاومات من التيارات أو تُنتج هبوطات فولطية تتناسب مع التيارات التي تحملها. تُخزّن المكثّفات الشحنة والطاقة، أو تساند التيارات في التدفق بين أجزاء في الطقم لها فولطيات مختلفة. تحدّ الدايودات من اتجاهات تدفق التيار، أو تُنتج هبوطات فولطية ثابتة (عادة 0.6V) في التيارات، أو تبعث ضوءاً. وتقوم الترانزستورات بمدى واسع من المهام، الأكثر شيوعا هو السماح للتيار أو الشحنة في دائرة بالتحكّم بالتيار أو الشحنة في دائرة أخرى. كما قد تكون قد واجهت دوائر إلكترونية متكاملة، مكوّنات معقدة تحتوي على تجميع مُسبق من الترانزستورات ومكوّنات أخرى أبسط.

أثناء تركيب الطقم، أدخلت المكوّنات في لوحة مطبوع عليها الدوائر الكهربائية وأكملت التوصيلات الكهربائية باستخدام اللحام. كان من المهم تركيب المكوّنات في الاتجاهات الصحيحة لأن بعضها، خصوصا الدايودات والترانزستورات، ليست تماثلية. إذا كنت قد استخدمت موسفت، كان عليك أن تعتني بالكهرباء الساكنة لأنه من السهل إتلاف عازل البوابة من قِبل الشحنات التائهة. وبينما صهرت القصدير في مكانه، كان من المهم تجنّب زيادة تسخين المكوّنات، خصوصا تلك التي تتضمن أشباه الموصلات، لأنها قد تحتوي على إلكترونيات وخصائص كهروكيميائية حساسة والتي يمكن أن تتلف بزيادة الحرارة.

ملخص الفصل

كيفية عمل المعدّلات الكهربائية

يستخدم المعدّل الكهربائي محوّلاً لنقل الكهرباء من تيار متردد ذي فولطية عالية من مقبس كهربائي إلى تيار متردد ذي فولطية منخفضة في ملفه الثانوي. يتدفق تيار الملف الثانوي خلال مجموعة من الدايودات شبه الموصّلة، والتي تعمل كمفاتيح لتوجيه ذلك التيار من المعدّل وخلال سلك كهربائه الموجب وعائدا للملف خلال سلك كهربائه السالب. يستخدم المعدّل مكثّفاً لتخزين الشحنة والطاقة، بالتالي مقللاً التذبذبات في الارتفاع الفولطي الناتجة من مصدر الكهرباء المتردد الأصلي. الناتج هو وحدة تعمل من تيار متردد ذي فولطية عالية وتوفّر تيارا مستمرا ذا فولطية منخفضة.
المعدّلات الأبسط تُلغي المكثّف وحتى بعض الدايودات، بينما المعدّلات الأكثر تعقيدا تتضمن أنظمة إلكترونية معقدة لتنظيم فولطياتها وتياراتها الخارجة والتحكم بها، ولتسمح لها بالعمل في مدى أوسع من الفولطيات الداخلة.

كيفية عمل المشغلات الصوتية

يجمع المشغّل الصوتي بين الكمبيوتر والمضخم الصوتي في وحدة واحدة. يُخزّن كمبيوتر المشغّل ويسترجع المعلومات الصوتية على هيئة رقمية، حيث يُمثّل كل قياس لضغط الهواء مجموعة من البت الثنائية. يمكن لهذه البت أن تأخذ قيمة 0 أو 1. للتخزين الطويل الأمد، يضع المشغّل معلوماته الصوتية الرقمية في ذاكرة فلاش و/أو ذاكرة قرص مغنطيسي. للتخزين المؤقت أثناء تشغيل أغنية أو استعراض قائمة الأغاني، يستخدم المشغّل ذاكرة ديناميكية.

بعد أن عالج كمبيوتر المشغّل تلك المعلومات رقميا، باستخدام عناصر منطقية مبنية أساسا من الموسفت، فإنه يمرر المعلومات الرقمية لمحوّل رقمي-تناظري وبعدها تأخذ هذه المعلومات هيئة تناظرية. تُمثّل هذه الإشارة التناظرية الصوت كتيار يتناسب مع إزاحة الصوت لضغط الهواء عن الضغط الجوّي.
تدخل إشارة الصوت التناظرية دائرة إدخال مضخّم المشغّل الصوتي، والتي تستفيد من الموسفت. يستخدم هذا المضخّم كهرباء يحصل عليها من البطارية لإنتاج إشارة خارجة تُمثّل نفس الصوت لكن بفولطية وتيار متزايدين. لهذه الإشارة الخارجة المضخّمة قدرة كافية لإنتاج صوت مرتفع في السمّاعات الرأسية.

تحقق من فهمك - الإجابات

١٢-١ المعدّلات الكهربائية

١. لا يتدفق أي جزء منه خلال المقبس الكهربائي.

لماذا: يتدفق التيار من المقبس الكهربائي خلال الملف الابتدائي لمحوّل المعدّل ثم يعود إلى المقبس الكهربائي. ويتدفق التيار من الملف الثانوي لذلك المحوّل خلال المذياع ثم يعود للملف الثانوي. هاتان الدائرتان، أي الدائرة الابتدائية مع مقبس الكهرباء والدائرة الثانوية مع المذياع، معزولتان كهربائيا: يمكنها أن تتبادل الكهرباء لكن لا تتبادلان الشحنة. يوفّر العزل بين هاتين الدائرتين مقياساً للأمان الكهربائي لمستخدم المذياع والمعدّل الكهربائي.

٢. بالطبع.

لماذا: مثل كل شيء آخر في الطبيعة، للذرات خصائص جسيمية وموجية. تسير الذرات كموجات وقد تم مؤخرا إظهار أن لها العديد من الخصائص الموجية التي درسناها في الفصل التاسع، بما في ذلك الانكسار والانعكاس والتداخل.

٣. سيذهب الإلكترون لأدنى مستوى طاقة فارغ، والذي هو فوق مستوى فيرمي مباشرة.

لماذا: بما أن كل إلكترون يذهب لأدنى مستوى طاقة متوفر، فإن هذا الإلكترون الجديد سيملأ المستوى الذي يعلو مستوى فيرمي مباشرة. في الحقيقة، إذا كان للكرة المعدنية عدد فردي من الإلكترونات، فإن مستوى فيرمي يحتوي فقط على إلكترون واحد. في هذه الحالة، سيملأ الإلكترون الجديد المكان الشاغر الآخر في مستوى فيرمي.

٤. يسقط شعاع الضوء على الموصّل الضوئي، فيسمح له بحمل تيار يُشغّل محرك الحزام الناقل. عندما تحجب الأطعمة الضوء، يصبح الموصل الضوئي عازلا كهربائيا ويتوقف الحزام عن الحركة.

لماذا: من الشائع استخدام الموصّلات الضوئية كمستشعرات للضوء. يسمح الضوء للموصل الضوئي بحمل تيار، ويمكن استخدام ذلك التيار لتشغيل آلات، أو إثارة جهاز إنذار، أو فتح وغلق الأضواء. في الحالة الحالية، هو يُشغّل محرك الحزام الناقل.

٥. سيتدفق التيار خلال الدائرة في نصف الوقت فقط وسيخفت مصباحك.

لماذا: إذا أضفت دايوداً في دائرة تيار متردد ، فإنه سيمنع التيار من التدفق في أحد الاتجاهين. سيتدفق التيار خلال الدائرة فقط أثناء نصف كل دورة للكهرباء عندما يكون مهبط الدايود مشحونا سلبيا ومصعده مشحوناً إيجابيا. بما أن المصباح سيستقبل فقط نصف الكهرباء الأصلية تقريبا، فإن فتيلته لن تصل لدرجة حرارة تشغيلها الطبيعية. سيتوهج المصباح بشكل خافت لكنه سيعيش لزمن طويل جدا. في الغالب تُستخدم الدايودات بهذا الشكل لإنشاء مستويات خافتة من الضوء في المصابيح أو الأجهزة.

٦. يمكنه أن يُخزّن الطاقة كشحنات منفصلة على مكثّف كبير.

لماذا: يحفظ مزوّد كهرباء الاستريو الطاقة في مكثّفات إلكتروليتية كبيرة. أثناء ما يوفّر خط الكهرباء قدرة كهربائية وفيرة، فإن مزوّد الكهرباء يستخدم تلك الكهرباء لزيادة الشحنات المنفصلة على مكثّفاته. عندما لا يوفّر سلك الكهرباء الكهرباء، فإن مزوّد الكهرباء يسحب طاقة من المكثّفات. من المؤسف أن المكثّفات الإلكتروليتية تُستهلك بسرعة وكثيراً ما تسرّب سائلها الإلكتروليتي. ما أن يتسرب أحدها، فإنه لا يستطيع حفظ الطاقة بشكل جيّد وسيُصدر الاستريو طنيناً.

٧. تعاني المعدّلات مشاكل أكبر في أوربا.

لماذا: بما أن شبكة الكهرباء الأوربية تعمل بتردد أقل، فإنها تتطلب من المعدلات الكهربائية أن تتحمّل فترات أطول من الانعدام النسبي للكهرباء.

١٢-٢ المشغّلات الصوتية

١. الإجابة: 129

لماذا: يحتوي الثنائي 10000001 على مائة وثمانية وعشرين واحدة (2^7) وواحد (2^0) فقط. جميع القوى الأخرى للعدد 2 غير موجودة. بما أن 128 + 1 هو 129، فإن هذا هو الرقم الذي يمثله ذلك الثنائي.

٢. يمكن للمضخّم أن يرسل تيارا خلال مقاومة.

لماذا: بتمرير التيار خلال مقاومة، يحوّل المضخّم معظم القدرة الكهربائية المُتبقية للتيار إلى قدرة حرارية. يغادر التيار المقاومة فقط بقدرة كهربائية كافية لحمله عائدا إلى مزوّد الكهرباء لإعادة الاستخدام.

٣. للترانزستور الأكبر بوابة أكبر أيضا. بوجود مساحة أكبر للبوابة لتنشر فيها شحنتها، تحتاج البوابة مزيدا من الشحنة الموجبة لكي تجذب إلكترونات مستوى التوصيل إلى القناة.

لماذا: تتراوح الموسفت في الحجم من صغير جدا (أقل من $0.1\mu m^2$) إلى كبير نسبياً (بضعة مليمترات مربعة). أصغرها تُستخدم في رقائق الكمبيوتر، حيث تُكوّن

ملايين من الموسفت على شريحة سيليكون واحدة مساحتها سنتيمتر مربع واحد فقط. إن وجود شحنة صغيرة جدا على بوابة أحد هذه الموسفت سيسمح له بتوصيل الكهرباء. تُستخدم الموسفت الأكبر في أجهزة التحكّم بالكهرباء كالمضخّمات ومزوّدات الكهرباء. لهذه الترانزستورات بوابات كبيرة وبالتالي يتطلب شحنات أكثر بكثير للسماح لأحدها بتوصيل التيار.

٤. يتأكد الكمبيوتر من أن الشحنة المخزونة على كل مكثّف في الذاكرة الديناميكية تمثّل محتوياته من البت على نحو كاف.

لماذا: بما أن الشحنة تتسرب بسرعة من المكثّفات في الذاكرة الديناميكية، فإن محتويات كل بت يجب أن تتجدد عدة مرات كل ثانية. عملية التجديد هذه، أي قراءة كل بت وإعادة تخزينها في الذاكرة، تُبطئ الكمبيوتر نوعا ما.

٥. يمكنك إيصال عاكس ببوابة NAND بحيث تكون الإشارة الخارجة من بوابة NAND هي الإشارة الداخلة للعاكس. عندما تكون إشارات إدخال بوابتي NAND هي 1، فإنه سينتج إشارة إخراج هي 0. سيصل هذا الـ 0 إلى العاكس، والذي سيعكسه ويخرج 1.

لماذا: إيصال العناصر المنطقية سوية أحدها تلو الآخر هو الطريقة القياسية لإنتاج عناصر منطقية أكثر تعقيدا. في هذه الحالة، ينتج عنصران عنصرا ثالثا.

٦. بوابة الموسفت.

لماذا: في جميع الاحتمالات، يُضيف التيار الداخل أو يزيل شحنات من بوابة الموسفت في مراحل المضخّم الأولى لعملية التضخيم.

تمارين

١. إذا احتوت قطعة صغيرة جداً من مادة على 10,000 إلكترون فقط وكان لهذه الإلكترونات أقل طاقة ممكنة، ما عدد المستويات المختلفة التي تشغلها الإلكترونات في تلك المادة؟

٢. إذا كان للإلكترونات أربعة مستويات داخلية مختلفة يمكن تمييز بعضها عن بعض، فكم عدد الإلكترونات التي يمكن أن تشغل المستوى نفسه دون انتهاك مبدأ باولي للاستبعاد؟

٣. إذا لم تكن الإلكترونات جسيمات فيرمي، فإن أي عدد منها يمكنه شغل مستوى معيّن. كيف يمكن أن ترتّب هذه الإلكترونات نفسها بين المستويات في جسم؟

٤. إذا لم تكن الإلكترونات جسيمات فيرمي (تمرين ٣)، هل سيظل هناك تمييز بين المعادن والعوازل؟ فسّر إجابتك.

٥. يمكن للطاقة الحرارية أن تُزيح بعض الإلكترونات في شبه موصّل ساخن من مستويات التكافؤ إلى مستويات التوصيل. ما تأثيرات هذه الإزاحات على مقدرة شبه الموصّل لتوصيل الكهرباء؟

٦. لماذا تُدمّر الأجهزة شبه الموصّلة ذاتيا عند زيادة التسخين؟

٧. هل النصف ذو النوع – م في الوصلة الثنائية م – س متعادل، أم موجب، أم سالب كهربائيا؟

٨. في أي اتجاه يُشير المجال الكهربائي في منتصف الوصلة م – س؟

٩. يوجد مكثّفان متماثلان فيما عدا أن أحدهما له طبقة عازلة أرق من الآخر. إذا خزّن المكثّفان نفس المقدار من الشحنة الكهربائية المنفصلة، أيهما سيكون له فرق الفولطية الأكبر بين لوحتيه؟

١٠. تُخزّن الذاكرة الديناميكية البت كوجود أو انعدام شحنات منفصلة على مكثّفات صغيرة جدا. يتطلب إنتاج شحنة منفصلة طاقة، والكمبيوتر الذي يتمكن من تقليل هذه الطاقة سيستخدم قدرة كهربائية أقل. لماذا يقلل ترقيق الطبقات العازلة في مكثّفات الذاكرة من الطاقة المطلوبة لتخزين كل بت فيها؟

١١. افترض أن بطارية تنقل الشحنات الموجبة من أحد لوحي مكثّف إلى اللوح الآخر. لماذا يزيد الشغل الذي تبذله البطارية في نقل الشحنة قليلا مع كل انتقال؟

١٢. يشبه المكثّف المشحون البطارية في أن كليهما يمكنه توفير قدرة كهربائية. ولكن بينما يوصّل المكثّف قدرته فإن فولطية التيار الذي يوفّره تتناقص. لماذا؟

١٣. ندمج الثلاث خانات العشرية 6، و3، و1 لتشكيل 631 من أجل تمثيل الرقم ٦٣١. ماذا تعني الـ 6 في 631؟ يوجد 6 من ماذا؟

١٤. ندمج الثلاث بت الثنائية 1، و0 ، و1 لتشكيل 101 لكي تمثّل العدد 5. ماذا يعني الـ 1 في أقصى يسار 101؟ يوجد 1 من ماذا؟

١٥. ما هي الأعداد التي يمثلها البتّان الثنائيان 11011011 و01010101؟

١٦. كيف يُمثّل العدد 165 في النظام الثنائي؟

١٧. لماذا لا يوجد 2 في التمثيل الثنائي للأعداد؟ (بعبارة أخرى، لماذا يكون 1101121 ليس تمثيلا ثنائيا صحيحاً؟)

١٨. للفائدة، كثيراً ما يُستخدم النظام السداسي عشر (قوى 16) بدلا من الثنائي. الرموز التقليدية المستخدمة لتمثيل الخانات السداسي عشر هي 0 – 9 وF – A. في النظام السداسي عشر، تُمثّل 10 العدد 16. وضّح أن خانة واحدة في النظام السداسي عشر يمكنها أن تستبدل تماما أربع خانات ثنائية.

١٩. إن بوابة الموسفت منفصلة عن القناة بطبقة عازلة رقيقة بشكل مدهش. هذه الطبقة سهلة الخرق من قِبل الكهرباء الساكنة، ورغم ذلك يستمر المصنّعون في استخدام الطبقات الرقيقة. لماذا سيُفسد تسميك الطبقة العازلة مقدرة الموسفت للاستجابة للشحنة على بوابته؟

٢٠. في الموسفت ذي القناة – س، يتصل الباعث والمُجمّع بشريط رقيق من شبه موصّل نوع – م. لماذا يُسجّل هذا الجهاز على أن له قناة – س
بدلا من قناة – م؟

٢١. لا يتغيّر الموسفت مباشرة من عازل مثالي إلى موصّل مثالي عندما تُغيّر الشحنة على بوابته. فبكميّات متوسطة من الشحنة على بوابته، يعمل الموسفت كمقاومة بمقاومة كهربائية معتدلة. هذه المرونة تسمح للموسفت بالتحكّم في مقدار التيار المتدفق في دائرة كهربائية. فسّر لماذا يُصبح الموسفت دافئاً أثناء تحكّمه بذلك التيار.

٢٢. الموسفت التي تُستخدم لتحريك الشحنة من وإلى المكثّفات في الذاكرة الديناميكية صغيرة جدا بحيث لا تكون موصّلات جيدة على الإطلاق. لماذا تُطيل مقاوماتها الكهربائية المتواضعة من الزمن المُستغرق لتخزين أو إرجاع الشحنة من مكثّفات الذاكرة؟

٢٣. لماذا يحُدّ التأثير الموضّح في تمرين ٢٢ من السرعة التي يمكن للكمبيوتر أن يُخزّن أو يسترجع بها البت من ذاكرته الديناميكية؟

٢٤. إذا وصلت مُخرج عاكس في مدخل عاكس آخر، كيف سيرتبط مُخرج العاكس الثاني مع مُدخل العاكس الأول؟

٢٥. افترض أنك وصلت ميكروفوناً مباشرة بسمّاعة كبيرة غير مُضخّمة. لماذا لن تُعيد السماعة إنتاج صوتك بشكل عالٍ عندما تتحدث في الميكروفون؟

٢٦. لماذا لا يمكن للمضخّم الصوتي أن يعمل دون بطاريات أو مزوّد طاقة؟

٢٧. تُحب أن تستمع لأسطوانات فونوغراف قديمة لكن مضخّمك الصوتي الجديد ليس له مدخل للفونوغراف. تقوم بوصل الفونوغراف بمدخل مشغّل الأقراص المدمجة (CD) في الاستريو لكنك تجد أن ارتفاع الصوت منخفض جدا. لماذا؟

٢٨. لتعديل مشكلة ارتفاع الصوت في تمرين ٢٧، تشتري مضخّماً أولياً وتصله بين الفونوغراف ومدخل مُشغّل الأقراص المدمجة (CD) في الاستريو. تختفي مشكلة ارتفاع الصوت. ما الذي يقوم به المضخّم الأولي لحل المشكلة؟

الفصل ١٣

الموجات الكهرومغناطيسية

ترتبط المجالات الكهربائية والمغنطيسية ارتباطا وثيقا ببعضها بحيث يمكن لكل منهما أن يُنشئ الآخر حتى في الفراغ. في الحقيقة، يمكن للمجالين أن يكوّنا موجات كهرومغنطيسية، بحيث يكوّنان بعضهما البعض فيها بشكل لانهائي وتسير عبر الفراغ بسرعة هائلة. تُحيط بنا هذه الموجات الكهرومغنطيسية وهي أساس الكثير من تقنية اتصالاتنا، ونقل الحرارة الإشعاعي، ومقدرتنا لرؤية الكون الذي نعيش فيه.

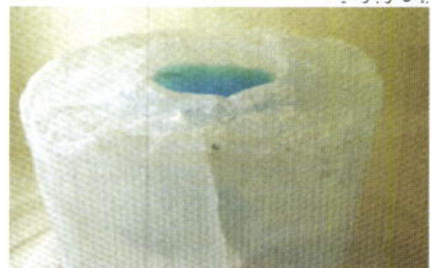
تجربة: غلي الماء في كوب جليدي

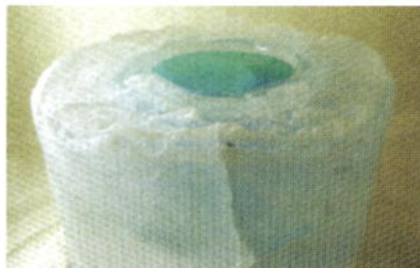
يمكنك أن تقوم بتجارب مع الموجات الكهرومغنطيسية باستخدام فرن المايكروويف. كما سنرى في القسم 2.13، موجات المايكروويف هي نوع من الموجات الكهرومغنطيسية التي تقع بين موجات الراديو والضوء المرئي. لأسباب سنتعرض لها في ذلك القسم، تنقل موجات المايكروويف الطاقة بسهولة لجزيئات الماء في سائل لكن ليس لجزيئات الماء في بلورة جليد. يسمح هذا الاختلاف للقيام بخدع طهي مثيرة.

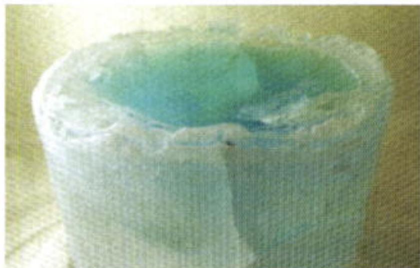
خذ مكعباً من الجليد من حجرة التجميد في الثلاجة وأذب سطحه العلوي ليُشكّل تجويفاً ضحلاً. ثم ضع المكعب في وعاء من السيراميك الآمن للاستخدام في فرن المايكروويف وأعده لحجرة التجميد لكي يبرد. ما أن يتجمّد المكعب والوعاء، أخرجهما من حجرة التجميد وضعهما بسرعة في فرن المايكروويف. املأ تجويف مكعب الجليد بالماء وشغّل المايكروويف مباشرة.
إذا كنت سريعا بشكل كافٍ، سيظل الماء في التجويف سائلاً عند بدء تشغيل المايكروويف. سيمتص الماء السائل طاقة من أشعة المايكروويف التي تملأ حجرة الطهي على خلاف الجليد. سيصبح الماء ساخنا جدا وسيبدأ بالذوبان في المكعب. لماذا كان من المهم تجميد الوعاء قبل وضع المكعب في فرن المايكروويف؟

إذا كنت محظوظا والمكعب كبير بما فيه الكفاية، فإن الماء في التجويف سيصل للغليان قبل أن يذيب طريقه خلال المكعب. حاول أن تتنبأ كيف سيتغيّر شكل منطقة السائل عندما يُسخنه المايكروويف. شاهد ماذا يحدث وحاول أن تتحقق من تنبئك. قس سرعة ذوبان الجليد وفكّر حول إمكانية استخدامك تلك القياسات لحساب مقدار القدرة التي يوصّلها فرن المايكروويف للماء.

بإذن لو بلومفيلد

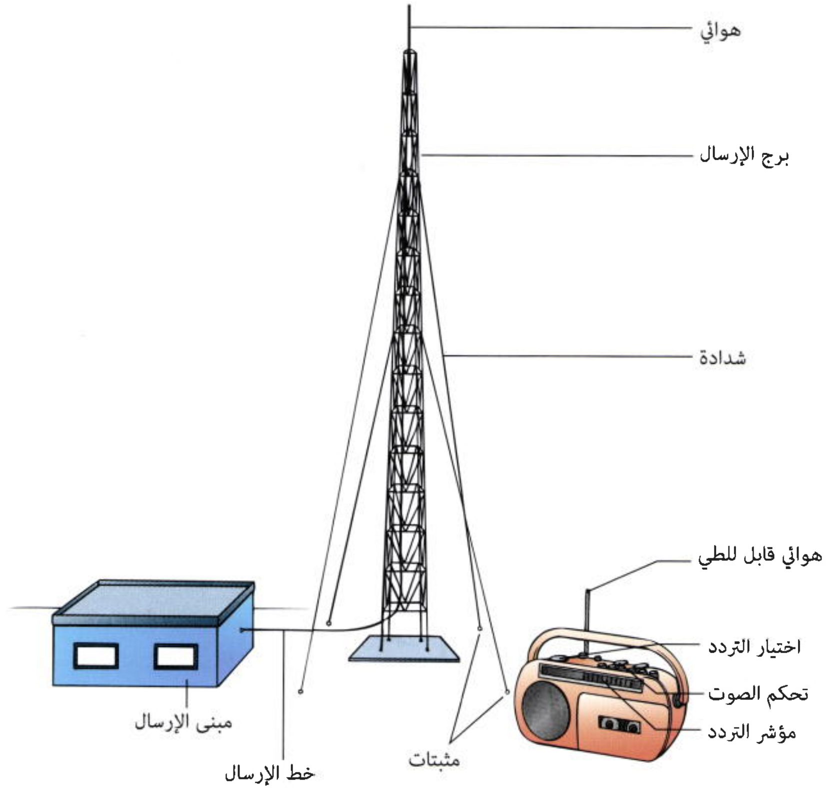






دليل الفصل

في هذا الفصل، سنناقش كيفية تكوّن واستشعار الموجات الكهرومغنطيسية في وضعين مألوفين: (١) المذياع و(٢) أفران المايكروويف. في قسم قسم المذياع، سنفحص الطرق التي يمكن للشحنة المتحركة في هوائي أن تشع بها أو تستجيب للموجات الكهرومغنطيسية وكيف يمكن التحكّم بهذه الموجات لكي ترسل إشارة صوتية من مرسل المذياع إلى مستقبله. في قسم أفران المايكروويف، سوف نرى كيف تؤثر موجات المايكروويف على جزيئات الماء والمعادن، وأيضا كيف تُنتَج في أنابيب المغنطرون في الفرن. وفي حين لا يمكننا أن نرى الموجات الكهرومغنطيسية التي يستخدمها هذان الجهازان، إلا أنها تلعب أدوارا مهمة في عالمنا. للمزيد عن ما سندرسه، انتقل لملخص الفصل في صفحة ٤٣٣.



١٣-١ المذياع

لقد رأينا أن التيارات الكهربائية يمكنها تمثيل الصوت وحمل الكلام والموسيقى إلى أي مكان تصل إليه الأسلاك. لكن كيف يمكننا أن نُرسل صوتا لشخص يتحرك؟ نحتاج طريقة لتمثيل الصوت لا تتضمّن الأسلاك. نحتاج إلى مذياع.

يصف هذا القسم كيفية عمل المذياع. سوف ننظر في كيفية إرسال موجات الراديو وكيفية استقبالها. سوف نفحص أيضا الطرق الشائعة التي يُمثّل فيها الصوت بموجات الراديو بحيث يستطيع السير خلال الفراغ ليصل لمستقبِل بعيد.

أسئلة للتفكير

كيف يمكن لحركة شحنة كهربائية في هوائي معدني أن تؤثّر على شحنة كهربائية في هوائي آخر قريب؟ ماذا لو كان الهوائي الثاني بعيدا عن الهوائي الأول؟ ماذا يعني أن محطة إذاعية تزعم أنها تنقل $50,000W$ ؟ كيف يختار مذياعك قناة من بين كل الاختيارات الأخرى؟

تجارب يمكن القيام بها

استمع لمذياع AM صغير ولاحظ أن ارتفاع الصوت يعتمد على توجيه المذياع أو موضعه. تدفع موجات الراديو الشحنات الكهربائية ذهابا وإيابا على طول الهوائي الداخلي للمذياع. يمكنك في بعض الأحيان إيجاد اتجاه يكون فيه المذياع صامتا لأن في ذلك الاتجاه لا تستطيع موجات الراديو تحريك الشحنات على طول الهوائي. إذا وضعت المذياع داخل صندوق معدني، فإنه سيصبح صامتا أيضا. هل يمكنك تفسير ذلك؟

يمكنك أن تحاول القيام بتجارب أخرى مشابهة بهاتف لاسلكي - في الحقيقة ما هو إلا مُرسل ومستقبل راديو. لاحظ المسافة التي يمكن أن تُبعد بها الهاتف قبل أن يفقد الاتصال بوحدة القاعدة. لاحظ أن حجم الهوائي وتوجيهه يؤثران على مداه. ماذا يحدث للاستقبال إذا وقفت خلف جسم معدني كبير؟

مقدمة عن موجات الراديو

قبل أن نستطيع فحص المذياع وموجات الراديو، لنأخذ بعض الوقت لإنهاء المقدمة للديناميكا الكهربائية التي بدأناها في الفصلين العاشر والحادي عشر. بالرغم من أننا قد تعلمنا معظم العلاقات الأساسية بين الكهرباء والمغنطيسية، إلا أن العلاقة المتبقية ستصبح مهمة. لإنعاش ذاكرتك، لقد لاحظنا إلى الآن أن المجالات الكهربائية يمكنها أن تنتج من الشحنات الكهربائية وبتغيير المجالات المغنطيسية، وأن تلك المجالات المغنطيسية يمكنها أن تنتج من الشحنات الكهربائية المتحركة (جدول ١,١,١٣).

في عام ١٨٦٥م، اكتشف الفيزيائي الاسكتلندي جيمز كليرك ماكسويل (١٨٣١-١٨٧٩م) مصدراً ثانياً للمجالات المغنطيسية: هو المجالات الكهربائية المتغيرة. إن ذلك التأثير دقيق وقد غفل عنه العلماء معظم القرن التاسع عشر. لم ينكشف هذا الاتصال الإضافي بين الكهرباء والمغنطيسية إلا عندما حاول ماكسويل أن يصيغ نظرية كاملة للكهرومغنطيسية. هذه العلاقة النهائية أكملت المجموعة الموضحة بالجدول ١,١,١٣. سوية، سمحت هذه العلاقات لماكسويل بفهم أحد الظواهر في الطبيعة الأكثر ذهولا: الموجات الكهرومغنطيسية!

الاتصال الثالث بين الكهرباء والمغنطيسية

تُنتج المجالات الكهربائية التي تتغير مع الزمن مجالات مغنطيسية.

بما أن المجالات الكهربائية يمكنها إنشاء مجالات مغنطيسية والمجالات مغنطيسية تحتوي على طاقة، فإنه من الواضح أن المجالات الكهربائية يجب أن تحتوي على طاقة أيضا. مقدار الطاقة في المجال الكهربائي المنتظم هو مربع شدة المجال مضروبا في حجم المجال مقسوما على 8π مضروبا في ثابت كولوم. يمكننا كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية: (١,١,١٣)

الطاقة = المجال الكهربائي² × الحجم / ثابت كولوم ×8π

ورمزيا:

$$U=\frac{E^2 \cdot V}{8\pi \cdot k}$$

وفي لغة الحياة اليومية: عندما تشحن مكثّفاً كبيراً فإنه يُخزّن مقداراً كبيراً جداً من الطاقة في المجال الكهربائي بين لوحيه.

جدول ١,١,١٣: مصادر المجالات الكهربائية والمغنطيسية

مصادر المجالات الكهربائية	مصادر المجالات المغنطيسية
الشحنة الكهربائية	الشحنات الكهربائية المتحركة
المجالات المغنطيسية المتغيرة	المجالات الكهربائية المتغيرة

بهذه الملاحظات، نكون قد انتهينا من المقدمة ومستعدين لرؤية كيفية عمل المذياع.

تحقق من فهمك # ١: مكثّف فيض حقيقي

(للإجابة، انظر صفحة ٤٣٤)

عندما يكون للمكثّف شحنات منفصلة على لوحيه، فإن هناك مجالا كهربائيا قويّا بين هذين اللوحين. بوصل اللوحين بسلك سيُفرّغ المكثّف وسيختفي مجاله الكهربائي فجأة. حينما يختفي المجال الكهربائي، ما هو المجال الآخر الموجود بين اللوحين؟

دقق في أرقامك # ١: البرق في المجالات

(للإجابة، انظر صفحة ٤٣٥)

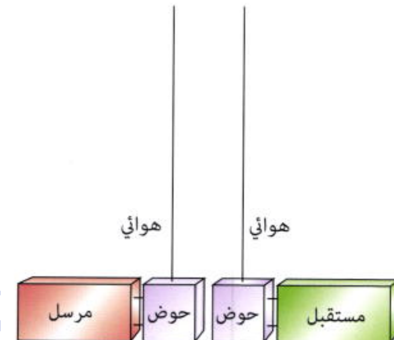
أثناء عاصفة رعدية، تُنتج السحب المشحونة مجالا كهربائيا مقداره حوالي 10,000V/m بالقرب من الأرض. ما مقدار الطاقة التي يحتويها 1 متر مكعب من ذلك المجال الكهربائي؟

الهوائيات ودوائر الرنين

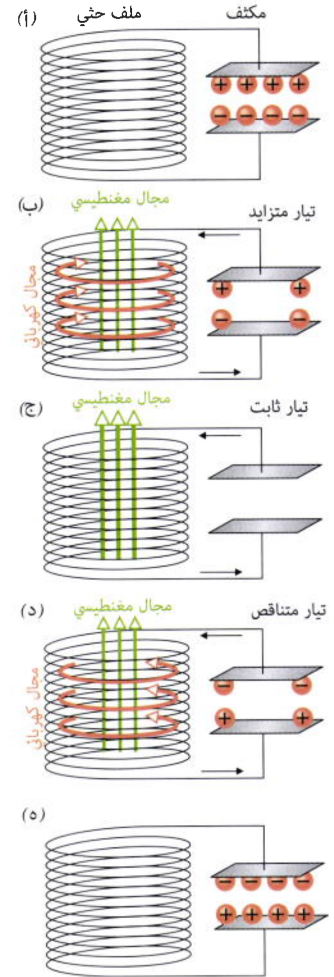
يتصل مرسل الراديو بمستقبل عن طريق موجات الراديو. تنتج هذه الموجات بواسطة شحنات كهربائية عندما تتحرك لأعلى وأسفل هوائي المرسل، ويتم استشعارها عندما تدفع الشحنات الكهربائية لأعلى وأسفل هوائي المستقبل. لكن ما هي موجات الراديو بالتحديد وكيف تُنتجها الشحنة التي على الهوائي؟

لقد سبق أن رأينا أن الشحنة الكهربائية تُنتج مجالات كهربائية وأن الشحنة المتحركة تُنتج مجالات مغنطيسية. ولكن شيئا جديدا يحدث عندما تتسارع الشحنات. تُنتج الشحنة المتسارعة مزيجا من المجالات الكهربائية والمغنطيسية المتغيّرة التي يمكنها أن تُنتج بعضها البعض بشكل لانهائي وتسير لمسافات طويلة خلال الفراغ. تُعرف هذه المجالات الكهربائية والمغنطيسية المتشابكة عامة بالموجات الكهرومغنطيسية. في حالة المذياع، الموجات الكهرومغنطيسية لها ترددات منخفضة وأطوال موجية طويلة وتُعرف بموجات الراديو.

لكن قبل أن ننظر في تركيب موجة الراديو وكيف تسير خلال الفراغ، لنبدأ بحالة أبسط بكثير. سننظر كيف يؤثر هوائيان معدنيان متجاوران على بعضهما البعض. يوضح الشكل (١،١،١٣) مُرسل ومستقبل مذياع، جنبا إلى جنب. بسبب قربهما من بعضهما، فإن الشحنة الكهربائية على هوائي المُرسل ستؤثر بالتأكيد في الشحنة على هوائي المستقبل.
للاتصال مع المستقبل المجاور، فإن المُرسل يرسل شحنة لأعلى وأسفل الهوائي الخاص به. يحيط المجال الكهربائي لهذه الشحنة هوائي الإرسال ويمتد على طول الطريق إلى هوائي المستقبل، حيث يدفع الشحنة للأعلى وللأسفل. من المؤسف أن حركة الشحنة الناتجة في هوائي المستقبل ضعيفة وقد يواجه المستقبل صعوبة في تمييزها من الحركة الحرارية العشوائية أو من الحركة الناتجة من مجالات كهربائية أخرى في البيئة. لذا، يتبنّى المُرسل إستراتيجية ذكية - يحرك المُرسل الشحنة أعلى وأسفل هوائيه بتناغم بتردد معيّن. بما أن الحركة الناتجة على هوائي المستقبل تناغمية بنفس التردد، فإنه من السهل على المستقبل أن يميّزها من الحركات التي ليست ذات علاقة.



شكل ١،١،١٣: تتسبب الشحنة الكهربائية المندفعة بسرعة على هوائي الإرسال وعنه في حركة مماثلة للشحنة الكهربائية في هوائي الاستقبال.



شكل ٢,١,١٣: تحتوي دائرة رنين على مكثّف وملف حثّي. تتدفق الطاقة بشكل تناغمي ذهابا وإيابا بين العنصرين.

إن استخدام هذه الحركة التناغمية له ميزة أخرى: يسمح للمرسل والمستقبل باستخدام دائرة رنين - أي دائرة إلكترونية رنينية تحتوي على مكثّف وملف حث فقط (شكل ٢,١,١٣). «تتدفق» الشحنة ذهابا وإيابا خلال دائرة الرنين بتردد معيّن، مثل تأرجح طفل ذهابا وإيابا على أرجوحة. وكما تستطيع أن تجعل طفلة تتأرجح بشدة في ساحة اللعب بدفعها بلطف عند كل أرجحة، فيمكن للمُرسل أن يجعل الشحنة تتأرجح بشدة خلال دائرة رنينه بإعطاء تلك الشحنة دفعة لطيفة كل دورة. بمساعدة المُرسل في تحريك كميات أكبر من الشحنة أعلى وأسفل الهوائي، فإن دائرة الرنين تقوّي الإرسال بشكل هائل.

تُساعد دائرة رنين ثانية متصلة بهوائي المستقبل في استشعار المستقبل لهذا الإرسال. تتسبب الدفعات التناغمية اللطيفة من قِبل المجالات من هوائي المُرسل في تحرك المزيد والمزيد من الشحنات خلال هوائي المستقبل ودائرة الرنين المتصلة به. في حين حركة الشحنة على هذا الهوائي وحده قد يصعُب استشعارها، إلا أن الشحنة الأكبر المتدفقة في دائرة الرنين واضحة جداً.

يمكننا فهم كيفية عمل دائرة رنين بالنظر في كيفية تحرك الشحنة بين مكثّفها وملفها الحثّي. دعنا نتخيّل أن دائرة الرنين تبدأ بشحنات منفصلة على لوحي مكثّفها (شكل ٢,١,١٣ أ). بما أن الملف الحثّي يوصّل الكهرباء، فإن التيار يبدأ بالتدفّق من اللوح المشحون إيجابيا، وخلال ملف الحثّ، إلى اللوح المشحون سلبيا. لكن التيار خلال ملف الحثّ يجب أن يرتفع ببطء، وبينما يحدث ذلك يكوّن مجالاً مغنطيسياً في ملف الحثّ (شكل ٢,١,١٣ ب).

عاجلا تختفي الشحنة المنفصلة في المكثّف، وجميع طاقة دائرة الرنين تُختزن في المجال المغنطيسي لملف الحثّ (شكل ٢,١,١٣ ج). لكن التيار يستمر في التدفق، مندفعاً إلى الأمام من قِبل معارضة ملف الحثّ للتغيرات في التيار. يستخدم ملف الحث الطاقة التي في مجاله المغنطيسي لإبقاء التيار متدفقا، فيعود ظهور شحنة منفصلة في المكثّف (شكل ٢,٢,١٣ د). في نهاية الأمر، يتناقص المجال المغنطيسي لملف الحثّ إلى الصفر ويعود كل شيء إلى وضعه الأصلي - تقريبا. في حين عادت جميع طاقة دائرة الرنين إلى المكثّف، فإن الشحنة المنفصلة في ذلك المُكثّف هي الآن مقلوبة رأسا على عقب (شكل ٢,١,١٣ هـ).

تتكرر هذه العملية بأكملها الآن بشكل عكسي. يتدفق التيار عكسيا خلال ملف الحث، فيمغنطه بشكل مقلوب، وتعود دائرة الرنين عاجلا إلى حالتها الأصلية. هذه الدورة تتكرر مرة بعد أخرى، بتأرجح الشحنة من أحد جانبي المُكثّف إلى الجانب الآخر وتعود مرة أخرى.
إن دائرة الرنين هي متذبذب توافقي إلكتروني، يُكافئ المتذبذبات التوافقية الميكانيكية التي فحصناها في الفصل التاسع. مثل جميع المتذبذبات التوافقية، فإن زمنها الدوري (الزمن لكل دورة) لا يعتمد على سعة التذبذب. لذا، بغض النظر عن كمية الشحنة المتأرجحة في دائرة الرنين، فإن الزمن الذي تستغرقه هذه الشحنة للتدفق ذهابا وإيابا هو دائما نفسه.

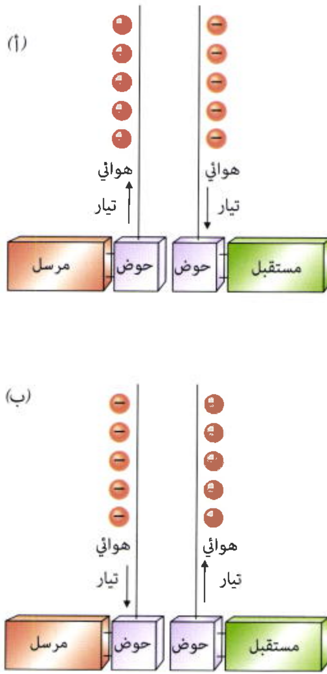
يعتمد الزمن الدوري لدائرة الرنين على مكثّفه وملفه الحثّي فقط. كلما زادت سعة المكثّف، زادت الشحنة المنفصلة التي يستطيع حملها بكمية طاقة مُعطاة وزاد الزمن الذي تستغرقه هذه الشحنة للتحرك خلال الدائرة على هيئة تيار. كلما زادت مُحاثّة الملف الحثّي - أي معارضته لتغيرات التيار - زاد الزمن الذي يستغرقه ذلك التيار للبدء والتوقف. دائرة الرنين التي لها مكثّف كبير وملف حثّ كبير قد يكون لها زمن دوري مقداره جزء من ألف من الثانية أو أكثر، بينما دائرة الرنين التي لها مكثّف صغير وملف حثّ صغير قد يكون لها زمن دوري مقداره جزء من البليون من الثانية أو أقل.

تُعرّف المُحاثّة على أنها الهبوط الفولطي عبر ملف الحثّ مقسوما على المعدل الذي يتغيّر فيه التيار خلال ملف الحثّ مع الزمن. هذه القسمة تُعطي المحاثّة وحدة الفولطية مقسومة على التيار لكل زمن. وحدة المحاثّة في

النظام العالمي SI هي الفولت - ثانية - لكل - أمبير، وتسمّى أيضا هنري (اختصارا H). في حين المغنطيسات الكهربائية الكبيرة لها مُحاثّات مقدارها مئات من الهنري، إلا أن ملف الحثّ ذا 1μH (0.000001H) هو الأكثر شيوعا في المذياع.

إن السلوك الرنيني لدائرة الرنين يجعلها مفيدة في المذياع. ذلك لأن الدفعات الصغيرة التناغمية على التيار في دائرة الرنين يمكنها أن تؤدي لتذبذبات هائلة للشحنة في تلك الدائرة. في المذياع، تبدأ هذه الدفعات التناغمية عندما يُرسل المُرسل تيارا مترددا خلال ملف سلكي. تدفع المجالات من هذا الملف التيار ذهابا وإيابا خلال دائرة رنين الإرسال القريبة، متسببة في تأرجح مقادير هائلة من الشحنة ذهابا وإيابا فيها وسيرها لأعلى وأسفل هوائي الإرسال. عندها يدفع المجال الكهربائي لتلك الشحنة بشكل تناغمي على الشحنة التي في هوائي المستقبل، متسببة في سير كميات كبيرة من الشحنة لأسفل ولأعلى الهوائي وتأرجحها ذهابا وإيابا في دائرة رنين الاستقبال (شكل ٣,١,١٣). من السهل على المستقبل استشعار هذه الشحنة المتأرجحة.

تتدفق الطاقة من المُرسل إلى المُستقبل عبر انتقال الطاقة الرنيني - من المُرسل، وإلى دائرة رنين الإرسال وهوائيه، وإلى هوائي المستقبل ودائرة رنينه، وأخيرا إلى المُستقبل. يمكن أن يعمل هذا الترتيب في الانتقال بكفاءة فقط إذا كان لكل الأجزاء رنين عند نفس التردد. إن ضبط مُستقبل المذياع لقناة معيّنة هو إلى حدّ كبير أمر يتعلّق بتعديل مكثّفه وملفه الحثّي بحيث يكون لدائرة رنينه التردد الرنيني الصحيح.



شكل ٣,١,١٣: (أ) بينما يتدفق التيار لأعلى هوائي المرسل، فإنه يتسبب في تدفق التيار لأسفل هوائي المستقبل و(ب) العكس بالعكس.

تحقق من فهمك # ٢: لا أحواض (للإجابة ، انظر صفحة ٤٣٤)

لماذا لا يدفع ببساطة مُرسل المذياع الشحنة الكهربائية مباشرة على الهوائي وعنه، دون استخدام دائرة رنين؟

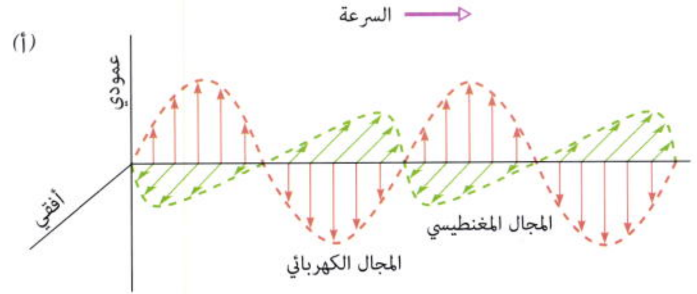
موجات الراديو

عندما يكون هوائيان قريبين من بعضهما، فإن الشحنة في هوائي الإرسال تبذل ببساطة قوة كهروستاتيكية على الشحنة في هوائي الاستقبال. لكن عندما يكون الهوائيان بعيدين عن بعضهما، فإن التفاعلات بينهما أكثر تعقيدا. يجب على الشحنة في هوائي الإرسال أن تشع موجة راديو لكي تدفع على الشحنة في هوائي الاستقبال. مثل موجة الماء، موجة الراديو هي اضطراب يحمل طاقة من مكان لآخر. لكن على خلاف موجة الماء، والتي يجب أن تسير في مائع، يمكن لموجة الراديو أن تسير خلال الفراغ، من أحد جوانب الكون إلى جانب آخر.

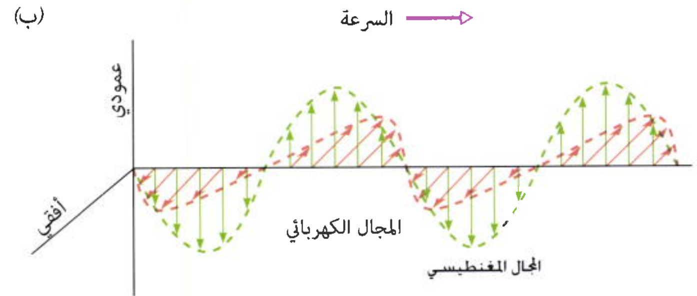
ومثل كل الموجات الكهرومغنطيسية، تتكوّن موجة الراديو من مجال كهربائي متغيّر ومجال مغنطيسي متغيّر فقط. تعيد هذه المجالات تكوين بعضها البعض مرة بعد أخرى أثناء سير الموجة خلال الفراغ بسرعة الضوء - تماما 299,792,458m/s (تقريبا 186,282 ميل - لكل - ثانية).

تنشأ موجة الراديو عندما تتسارع الشحنة الكهربائية في الهوائي. في حين تُنتج الشحنة الساكنة أو التيار الثابت مجالات كهربائية أو مغنطيسية ثابتة، فإن الشحنة المتسارعة تُنتج مجالات تتغيّر مع الزمن. بينما تتدفق الشحنة لأعلى وأسفل الهوائي، فإن مجالها الكهربائي يشير تبادليا للأعلى وللأسفل ومجالها المغنطيسي يشير تبادليا لليسار واليمين. عندها تعيد هذه المجالات المتغيّرة تكوين بعضها البعض مرة بعد أخرى، وتسير خلال الفراغ كموجة كهرومغنطيسية.

الموجة المنبعثة من هوائي إرسال رأسي لها استقطاب رأسي، أي أن مجالها الكهربائي يُشير تبادليا للأعلى وللأسفل (شكل ٤,١,١٣ أ). نُعرّف تلك «الارتفاعات» كقمم والمسافة بين قمتين متتاليتين هي طولها الموجي. بالنسبة لموجات الراديو، يكون ذلك الطول الموجي في العادة 1m (3.3ft) أو أكثر. المجال المغنطيسي للموجة



متعامد على مجالها الكهربائي وبالتالي يشير تبادليا لليسار ولليمين. إذا كان هوائي الإرسال مائلاً لجانبه، فإن المجال الكهربائي للموجة سيشير تبادليا لليسار واليمين وسيكون للموجة استقطاب أفقي (شكل ٤،١،١٣ ب). المجال المغنطيسي للموجة سيشير عندها تبادليا للأعلى وللأسفل. كيفما كان الاستقطاب، فإن المجالين الكهربائي والمغنطيسي يتحركان سوية للأمام كموجة متحركة، فنمط المجالات يتحرك بسلاسة خلال الفراغ بسرعة الضوء.



شكل ٤،١،١٣: (أ) في موجة كهرومغنطيسية مستقطبة رأسيا، يشير المجال الكهربائي على طول مسار الموجة المستوي تبادليا للأعلى وللأسفل بينما يُشير المجال المغنطيسي على طول ذلك المسار تبادليا لليمين ولليسار. (ب) في موجة مستقطبة أفقيا، يُشير المجال الكهربائي تبادليا لليسار ولليمين بينما يُشير المجال المغنطيسي تبادليا للأعلى وللأسفل.

معتقدات خاطئة شائعة: الموجات الكهرومغنطيسية والتموّج

المعتقد الخاطئ:

بما أن مجالات الموجة الكهرومغنطيسية تبدو متموجة (شكل ٤،١،١٣)، فإن موجة الضوء ذاتها تتموّج؛ في الحقيقة تتموّج للأعلى وللأسفل أو ذهابا وإيابا بينما تسير نـحو اليمين!

القرار:

الأسهم المرسومة لتمثيل المجالات في موجة كهرومغنطيسية مرتبطة بنقاط على طول محور الموجة المستقيم. كل موجة في الشكل (٤،١،١٣) تسير مباشرة نـحو اليمين على طول خط المحور والأسهم تشير لقيم المجال عند نقاط على طول ذلك الخط.

إذا وقفت في مكان واحد وشاهدت هذه الموجة تمر، ستلاحظ مجالها الكهربائي يتذبذب للأعلى وللأسفل عند نفس تردد الشحنة التي كوّنته. عندما تمر الموجة بهوائي استقبال بعيد، فإنها تدفع الشحنة لأعلى وأسفل ذلك الهوائي بهذا التردد. إذا كانت دائرة رنين الاستقبال في حالة رنين عند ذلك التردد، فإن مقدار الشحنة المتأرجحة فيها سيصبح كبيراً بما يكفي لاستشعار المستقبل.

يمكن لمحطة إذاعية أن تُحسّن إرسالها باستخدام هوائي إرسال ذي طول مناسب. عندما يكون ذلك الطول تماما ربع طول موجة الراديو التي يُرسلها فإن الشحنة تتأرجح بشدة لأعلى وأسفل الهوائي في رنين طبيعي. من المدهش أن الهوائي هو متذبذب توافقي إلكتروني آخر، بزمن دوري يعتمد فقط على طوله. (في الحقيقة، الهوائي هو النصف العلوي لدائرة الرنين، بحيث تعمل قمته كأحد لوحي المكثّف ويعمل طوله كالنصف العلوي للملف الحثّي. الأجسام التي عند قاعدة الهوائي تُكمل دائرة الرنين.) عندما يكون لدائرة رنين الإرسال والهوائي رنين عند نفس التردد، فإنه يوجد انتقال طاقة رنيني من أحدهما إلى الآخر. كما قد تتوقع، تساعد هذه التأثيرات الرنينية في إنتاج موجة راديو قوية.

يُرسل هوائي الإرسال أقوى جزء من موجة الراديو للخارج بشكل عمودي على طوله. هذا ليس غير متوقع لأن حركة الشحنة على الهوائي هي أكثر وضوحا عند رؤيتها من خط عمودي على طوله. لذا، يُرسل الهوائي الرأسي معظم موجاته للخارج أفقيا، حيث يستطيع الأشخاص استقبالها. لا تخرج أي موجة من طرفي الهوائي.

يحتوي كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي على طاقة. لذا، بينما تسير الموجة الكهرومغنطيسية خلال الفراغ، فإنها تحمل طاقة بعيدا عن المُرسل. عندما تُعلن محطة إذاعية أنها «تُرسل 50,000W من الموسيقى»، فإنها تزعم أن هوائيها يبعث 50,000J من الطاقة كل ثانية أو 50,000W من القدرة في موجته الكهرومغنطيسية. يجب أن يمتص هوائي الاستقبال ما يكفي من هذه القدرة لكي يستشعر الموجة. لكن كلما بعُدت الموجة عن هوائي الإرسال، زاد انتشارها وضعُفت أكثر. والأشجار والجبال أيضاً تمتص أو تعكس بعض الموجة فتعيق الاستقبال.

لاستقبال أفضل، يجب أن يتواجد المستمع في المكان الذي تكون فيه موجة الراديو قوية والمكان الذي فيه مسار غير محجوب بين هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال. يجب أن يكون طول هوائي الاستقبال ربع الطول الموجي ويجب أن يوجّه على طول استقطاب الموجة – رأسيا لموجة راديو مستقطبة رأسيا وأفقيا لموجة راديو مستقطبة أفقيا. إن اصطفاف هوائي الاستقبال مع استقطاب الموجة يجعل من المؤكد أن مجال الموجة الكهربائي يدفع الشحنة على طول الهوائي وليس عبره.

لضمان الاستقبال الجيّد بغض النظر عن توجيه هوائي الاستقبال، تُرسل العديد من محطات الإذاعة موجة معقدة مستقطبة دائريا والتي تدمج كلا من الاستقطاب الرأسي والأفقي. لتشكيل هذه الموجة، تحتاج المحطات العديد من الهوائيات ذات الطول الربع موجي. للأطوال الموجية الأقل من بضعة مترات، يمكن وصل هذه الهوائيات جميعا بسارية واحدة بثمن زهيد. ولهذا فإن بث إذاعة FM ونقل التلفاز التجاري، والتي تستخدم موجات راديو ذات طول موجي قصير، تُرسل في الغالب باستقطاب دائري. ولكن بث إذاعة AM التجارية، والذي يستخدم موجات راديو ذات طول موجي طويل، يُرسل فقط باستقطاب رأسي. بسبب أن موجات راديو الـ FM التجارية في الغالب تتضمّن كلا الاستقطابين، فإن هوائيات استقبال FM يمكنها أن تكون رأسية أو أفقية. في الغالب تستخدم مستقبلات FM المتنقلة هوائيات رأسية تلسكوبية بينما تستخدم المستقبلات المنزلية في الغالب هوائيات أفقية سلكية. طول جميع هذه الهوائيات هو تقريبا ربع طول موجي.

يجب أن يكون طول الهوائيات ذات الربع طول موجي في مذياع AM التجاري حوالي 100m (300ft)، لذا فإن هوائيات AM المستقيمة (مثل التي في السيارات) هي أقصر من الطول الأمثل. ولهذا فإن العديد من هوائيات AM مصممة للاستجابة لمجال موجة الراديو المغنطيسي الأفقي بدلا من مجالها الكهربائي الرأسي. هذه الهوائيات المغنطيسية هي ملفات سلكية أفقية تواجه تيارات مستحثّة عندما تتعرض لمجالات مغنطيسية متذبذبة.

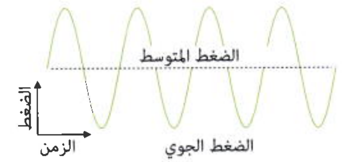
تحقق من فهمك # ٣: ليس هناك مكان مثل المنزل (للإجابة ، انظر صفحة ٤٣٤)

لماذا تعمل الهواتف اللاسلكية فقط عندما تكون قريبة من وحدة قاعدتها؟

تمثيل الصوت: راديو AM و FM

يقوم مُرسل المذياع بأكثر من مجرد إرسال موجة راديو. إنه يستخدم موجة الراديو تلك لتمثيل الصوت. بما أن الموجات الصوتية هي تذبذبات في كثافة الهواء وموجات الراديو هي تذبذبات في المجالات الكهربائية والمغنطيسية، فإن موجة الراديو لا يمكنها حرفيا «حمل» موجة صوتية. ولكن يمكن لموجة الراديو أن تحمل معلومات صوتية وتُرشد المستقبل في كيفية إعادة إنتاج الصوت.

لنقل المعلومات الصوتية، تغيّر محطة الإذاعة موجة الراديو الخاصة بها لتُمثّل انضغاطات وتخلخلات الهواء. بعد ذلك يُعيد





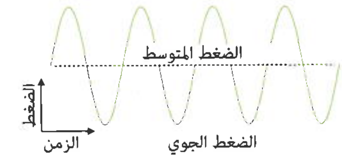
شكل ٥،١،١٣: عندما يتم إرسال الصوت باستخدام تعديل السعة، فإن ضغط الهواء يُمثَّل بشدة موجة الراديو. يُمثَّل الانضغاط بزيادة شدة موجة الراديو ويُمثَّل التخلخل بتضعيفها.

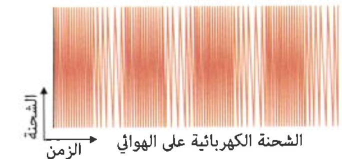
المستقبل تكوين تلك الانضغاطات والتخلخلات. هناك تقنيتان شائعتان يمكن من خلالها لموجة الراديو أن تُمثِّل تلك التذبذبات في الكثافة. إحداها تُسمّى تعديل السعة وتتضمّن تغيير القوة الإجمالية لموجة الراديو. والأخرى تسمّى تعديل التردد وتتضمّن تغييرات صغيرة في تردد موجة الراديو.

في تقنية تعديل السعة (AM)، تُمثَّل كثافة الهواء بقوة الموجة المُرسلة (شكل ٥،١،١٣). لتمثيل انضغاط في الهواء، يتم رفع الإرسال بحيث تتحرك شحنة أكبر أعلى وأسفل هوائي الإرسال. لتمثيل التخلخل، يتم خفض الإرسال بحيث تتحرك شحنة أقل أعلى وأسفل الهوائي.

التردد الذي تتحرك به الشحنة لأعلى وأسفل الهوائي يظل ثابتا، فتتغير سعة موجة الراديو فقط. يقيس المستقبل شدة موجة الراديو ويستخدم هذا المقياس لإعادة تكوين الصوت. عندما يستشعر المستقبل موجة راديو قوية، فإنه يدفع سمّاعته نحو المستمع ويضغط الهواء. وعندما يستشعر المستقبل موجة راديو ضعيفة، فإنه يسحب السمّاعة بعيدا عن المستمع ويخلخل الهواء.

في تقنية تعديل التردد (FM)، تُمثَّل كثافة الهواء بتردد الموجة المُرسلة (شكل ٦،١،١٣). لتمثيل انضغاط في الهواء، يُرفع تردد المُرسِل بشكل طفيف بحيث تتحرك الشحنة لأعلى وأسفل هوائي الإرسال أكثر قليلا من الطبيعي. لتمثيل التخلخل، يُخفَّض تردد المُرسِل بشكل طفيف بحيث تتحرك الشحنة لأعلى وأسفل الهوائي أقل قليلا من الطبيعي. هذه التغيرات في التردد صغيرة جدا - صغيرة بحيث تستمر الشحنة بالتأرجح بشدة في المكونات الرنينية فلا يتأثر الاستقبال. يقيس المُستقبل تردد موجة الراديو ويستخدم هذا القياس لإعادة تكوين الصوت. عندما يستشعر المُستقبل زيادة في التردد فإنه يضغط الهواء، وعندما يستشعر انخفاضاً في التردد فإنه يخلخل الهواء.





شكل ٦،١،١٣: عندما ينتقل الصوت بتعديل التردد، فإن ضغط الهواء يُمثَّل بتغيير تردد مُرسِل المذياع بشكل طفيف. يُمثَّل الانضغاط بزيادة ذلك التردد والتخلخل بانخفاضه.

على الرغم من أن تقنيات AM وFM لتمثيل الصوت يمكن أن تُستخدم مع موجة راديو عند أي تردد، إلا أن النطاقات الأكثر شيوعا تجاريا في الولايات المتحدة هي نطاق AM بين 550kHz و1600kHz (550,000Hz و 1,600,000Hz) ونطاق FM بين 88MHz و108MHz (88,000,000Hz و 108,000,000Hz). توجد في أماكن أخرى في طيف ترددات الراديو العديد من الإرسالات التجارية والعسكرية والعامة، بما في ذلك نطاقات التلفاز والموجات القصيرة ومذياع الهواة والهاتف والشرطة والطائرات. تستخدم هذه الإرسالات الأخرى تقنيات AM وFM وبضع تقنيات أخرى لتمثيل الصوت والبيانات بموجات الراديو.

تحقق من فهمك # ٤: تحكّم آخر في ارتفاع الصوت (للإجابة، انظر صفحة ٤٣٤)

عندما تستمع لإذاعة AM في السيارة وتسير عبر نفق، فإن ارتفاع الصوت ينخفض كثيراً. فسّر ذلك.

عرض النطاق والكوابل

للإشارة الصوتية في سلك مدى من الترددات موجود في داخله، من تردد صفري إلى أعلى درجة صوت تُمثِّلها. بالمثل، الإشارة الصوتية التي تسير بواسطة موجة راديو لها مدى من ترددات موجات الراديو موجود فيها، يمتد من أدنى من التردد الرسمي لموجة الراديو بقليل، أي تردد الموجة الحاملة، إلى أعلى ذلك التردد بقليل.

كلما زاد عرض مدى التردد الصوتي، زادت المعلومات الصوتية التي يجب أن تُرسل كل ثانية وزاد مدى ترددات الراديو اللازم لتمثيل ذلك الصوت. يُعرف مدى الترددات اللازم لنقل مثل هذا السيل من المعلومات بعرض نطاق الإرسال.

وفق الاتفاقيات الدولية، يمكن لمحطة إذاعة AM أن تستخدم عرض النطاق 10kHz، أي 5kHz أعلى وأدنى من تردد الموجة الحاملة. للبقاء في عرض النطاق هذا، لا يمكن للإشارة الصوتية أن تحتوي على ترددات فوق 5kHz. في حين هذا المدى الترددي المقيّد يُعدُّ سيئا للموسيقى، إلا أنه يسمح للمحطات المتنافسة بالعمل مع ترددات موجات حاملة تفصل بينها 10kHz فقط، بحيث يمكن لـ 106 محطة أن تعمل بين 550kHz و 1600kHz.

يمكن أن تستخدم محطة إذاعة FM عرض نطاق 200kHz، أي 100kHz على كل جانب من تردد موجتها الحاملة. تسمح هذه الحصة المترفة لإذاعة FM أن توفّر مدى عريضاً جدا من الترددات الصوتية، في الاستيريو، ولذلك يمكن لمحطة إذاعة FM أن تقوم بعمل أفضل في إرسال موسيقى لمذياعك مقارنة بما تستطيعه محطة إذاعة AM.

ولكن طيف الموجات الكهرومغنطيسية مصدر محدود وإذا لم يمكن استخدامه سوى مرة واحدة فقط فإنه سينفد بسرعة من عروض النطاقات. من حسن الحظ أن المسافات والتطويق يجعل من الممكن إعادة استخدام الطيف عدة مرات. الهواتف الخلوية البعيدة عن بعضها يمكنها أن تتشارك في نفس ترددات حاملات الموجة وعرض النطاق لأن موجات الراديو الخاصة بها تضعف مع زيادة المسافة ولا تتداخل أساسا. ولكن حتى إرساليات الإذاعة القريبة يمكنها أن تستخدم نفس ترددات حاملات الموجة بتطويق موجاتها الكهرومغنطيسية داخل كوابل.

تُشابه شبكة كوابل المذياع والتلفاز والبيانات شبكات البث إلا أنها تُرسل موجات كهرومغنطيسية خلال كوابل بدلا من الفراغ. يحتوي كابل المذياع أو التلفاز الاعتيادي على سلك معدني معزول داخل أنبوب من معدن رقيق أو شبك معدني. يُسمّى هذا الترتيب من سلك داخل أنبوب بكابل متحد المحور لأن مكونيْه المعدنيين يتشاركان في نفس الخط المركزي أو المحور. على النقيض من ذلك، تحتوي كابلات بيانات الكمبيوتر الاعتيادية على عدد من الأسلاك المعدنية المعزولة الملتفة في عدد من الأزواج.

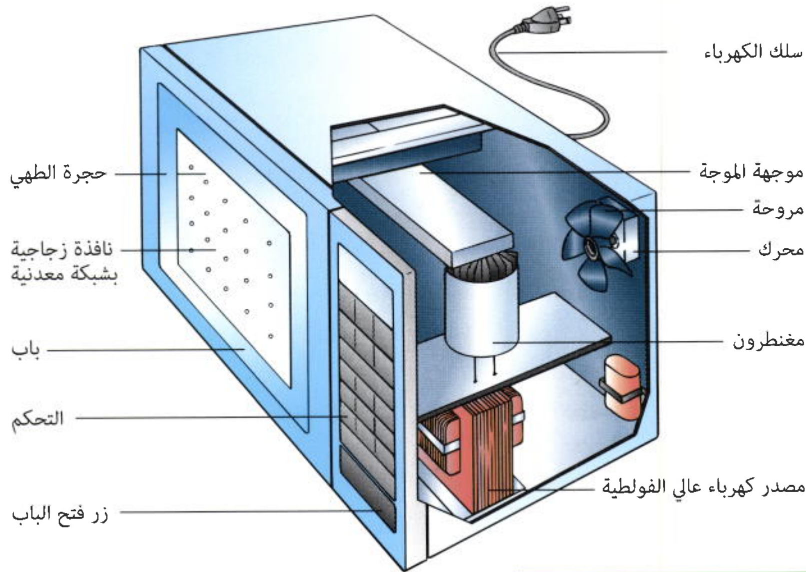
يمكن للموجات الكهرومغنطيسية أن تنتقل بسهولة خلال الكوابل المتحدة المحور أو كوابل الأزواج الملتفة، متبعة التفافاتها وانعطافاتها من المُرسل الذي يُنتج الموجات إلى المُستقبل الذي يستخدمها. إن كون الأسلاك تساند هذه الموجات في سيرها يجعلها أكثر تعقيدا من الموجات التي تسير في الفراغ. ولكنها مازالت تتضمن مجالات كهربائية ومغنطيسية ومازالت تنتقل إلى الأمام بسرعة الضوء تقريبا.

بما أن الموجات الكهرومغنطيسية داخل الكابل لا تتفاعل مع الموجات خارجه، فإن المُرسل والمستقبل يمكنهما استخدام أي جزء من الطيف يختارانه، دون الاهتمام بموضوع المشاركة. يمكن للكابل المتحد المحور الاعتيادي أن يحمل ترددات تصل لحوالي 1000MHz وفي كابل الأزواج الملتفة قد تصل إلى 350MHz، فيمكن لأي منهما أن يحمل كمية هائلة من المعلومات في كل ثانية.

ولكن يجب الآن على الكوابل المتحدة المركز أن تتنافس مع كوابل الألياف البصرية والتي توجّه الضوء من مكان إلى آخر. سوف نفحص الألياف البصرية في القسم ١٥-٢. مثل موجات الراديو، الضوء هو موجة كهرومغنطيسية يمكن أن تعدّل سعتها أو ترددها لتمثيل المعلومات. ولكن تردد الضوء عالٍ جدا؛ فتمتد ترددات الضوء المرئي من 4.5×10^{14} Hz إلى 7.5×10^{14} Hz. إذا كنّا سنُخصّص قنوات إذاعة FM تبعد كل منها عن الأخرى بمقدار 200kHz خلال الطيف المرئي، فإنه سيكون هناك تقريبا 1.5 بليون قناة متوفرة!

تحقق من فهمك # ٥: المحدودية وعرض النطاق (للإجابة، انظر صفحة ٤٣٤)

أنت تعزف على البيانو لمحطة إذاعة AM فتضرب على أعلى مفتاح على البيانو. درجة الصوت الناتج هي 4186Hz. هل يمكن للمستمعين أن يسمعوا تلك النغمة من مذياعهم؟



١٣-٢ أفران المايكروويف

بالإضافة إلى حمل الأصوات من مكان لآخر، يمكن للموجات الكهرومغنطيسية أن تحمل قدرة. أحد الأمثلة المثيرة لمثل هذا الانتقال في القدرة هو فرن المايكروويف. يستخدم الفرن موجات كهرومغنطيسية ذات تردد عالٍ نسبيا لنقل القدرة مباشرة إلى جزيئات الماء في الطعام، بحيث ينضج الطعام من الداخل إلى الخارج. يُناقش هذا القسم كلا من كيفية إنشاء هذه الموجات ولماذا تُسخن الطعام.

أسئلة للتفكير

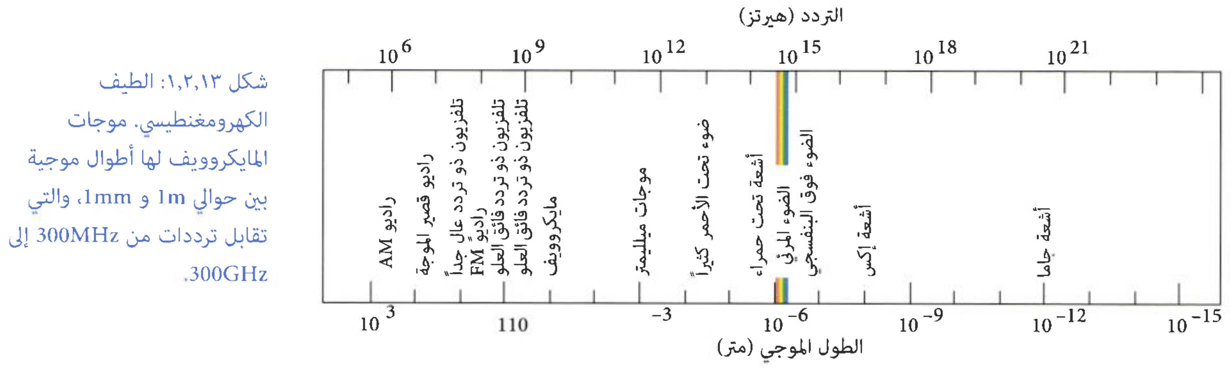
لماذا تميل أفران المايكروويف لطهي الطعام بشكل غير متساوٍ إذا لم تُحرك الطعام أثناء الطهي؟ كيف يمكن لجزء من وجبة مجمّدة أن يصبح ساخناً لدرجة الغليان بينما جزء آخر يظل مجمّداً؟ لماذا يجب أن تكون حذرا مع الأجسام المعدنية الموضوعة داخل الفرن؟ لماذا تظل بعض الأجسام باردة في فرن المايكروويف بينما أجسام أخرى تصبح ساخنة جدا؟ كيف يعمل فشار المايكروويف؟

تجارب يمكن القيام بها

ينقل فرن المايكروويف القدرة أساساً إلى الماء في الطعام. يمكنك رؤية هذا التأثير بوضع مقادير طعام خالية من الماء مثل الملح أو البيكنج بودر أو السكر أو زيت السلطة في وعاء سيراميك آمن للاستخدام في فرن المايكروويف. اطهِ المقادير قليلا. ستجد أن المقادير والوعاء تظل باردة نسبيا. أضف قليلا من الماء إلى المجموعة. ماذا يحدث عندما تطهوها هذه المرة؟ الآن جرّب أن تطهو مكعب جليد بارداً جدا. يجب أن يأتي المكعّب مباشرة من حجرة التجميد في الثلاجة على صحن بارد كبرودة الجليد، بحيث يكون سطحه صلبا وجافا. ماذا يحدث؟ إذا احتوى الجليد على ماء والماء هو ما يمتص القدرة في فرن المايكروويف، فلماذا لا يمتص الجليد القدرة ويذوب؟

المايكروويف والطعام

عند دراسة المصابيح المتوهجة في قسم ٧-٣، ناقشنا الأطوال الموجية للموجات الكهرومغنطيسية. بينما فحصنا المذياع، ركّزنا على ترددات الموجات الكهرومغنطيسية. ولكنا نعرف من معادلة (١,٢,٩) أن الطول الموجي وتردد الموجة ليسا مستقلين. الموجة الكهرومغنطيسية في الفراغ لها كل من طول موجي وتردد، وحاصل ضربهما هو سرعة الضوء.



شكل ١,٢,١٣: الطيف الكهرومغنطيسي. موجات المايكروويف لها أطوال موجية بين حوالي 1m و 1mm، والتي تقابل ترددات من 300MHz إلى 300GHz.

يمكن كتابة هذه العلاقة كمعادلة لفظية:

سرعة الضوء = الطول الموجي × التردد (١,٢,١٣)

ورمزيا:

$$c = \lambda . \nu$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما زاد تردد موجة كهرومغنطيسية، قلّ طولها الموجي.

مثل الشكل (٢,٣,٧)، يوضح الشكل (١,٢,١٣) الأطوال الموجية التقريبية للعديد من أنواع الموجات الكهرومغنطيسية لكنه يوضح أيضا تردداتها.

يستخدم بث المذياع جزء الطيف الكهرومغنطيسي ذا التردد المنخفض والأطوال الموجية الطويلة. يعمل مذياع AM التجاري عند الترددات 550kHz إلى 1600kHz (الأطوال الموجية 545m إلى 187m) ويعمل مذياع FM التجاري عند 88MHz إلى 108MHz (الأطوال الموجية 3.4m إلى 2.8m). بما أن هذه الموجات لها أطوال موجية أطول من 1m، فتُسمّى موجات راديو. لكن الموجات الكهرومغنطيسية المستخدمة في أفران المايكروويف لها أطوال موجية أقصر من 1m وتُسمّى مايكروويف. تمتد موجات المايكروويف من طول موجي 1m (3.3ft) نزولا إلى 1mm (0.04 بوصة).

لتفسير كيفية تسخين فرن المايكروويف للطعام (انظر [٥])، لنبدأ بالنظر إلى جزيئات الماء. جزيئات الماء مستقطبة كهربائيا – أي لها أطراف مشحونة إيجابيا وأطراف مشحونة سلبيا. يحدث هذا الاستقطاب بسبب الفيزياء الكمية وميل ذرات الأكسجين لجذب الإلكترونات بعيدا عن ذرات الهيدروجين. إن جزيء الماء منحنٍ، حيث تبرز ذرتاه الهيدروجينية للأعلى من ذرته الأكسجينية مثل أذني ميكي ماوس. عندما تجذب ذرة الأكسجين الإلكترونات بعيدا عن ذرات الهيدروجين جزئياً، فإن جانبها من الجزيء يُصبح مشحونا سلبيا بينما يُصبح جانب ذرات الهيدروجين مشحونا إيجابيا. وبالتالي فإن الماء جزيء قطبي.

في الجليد، تترتب جزيئات الماء القطبية هذه بترتيب منتظم بمواقع وتوجيهات ثابتة. ولكن في الماء السائل، تتوجه الجزيئات بشكل أكثر عشوائية (شكل ٢,٢,١٣). إن ترتيب الجزيئات مقيّد فقط بميلها للترابط مع بعضها، الطرف الموجب بالطرف السالب، لتشكيل شبكة كثيفة من الجزيئات المترابطة. يُعرف هذا الترابط بين ذرة الهيدروجين ذات الشحنة الموجبة في جزيء ماء وذرة الأكسجين ذات الشحنة السالبة في جزيء آخر بالرابطة الهيدروجينية.

إذا وضعت ماء سائلاً في مجال كهربائي قوّي، فإن جزيئاته ستميل للدوران للاصطفاف مع المجال. ذلك لأن الجزيء غير المصطف له طاقة كهروستاتيكية كامنة إضافية ويتسارع في الاتجاه الذي يقلل من طاقته الكامنة

[٥] على الرغم من أنه تيتم صغيرا ولم يُكمل تعليمه الابتدائي، إلا أن الأمريكي بيرسي ليبرون سبينسر (١٨٩٤ - ١٩٧٠م) كان له مستقبل وظيفي رائع كعالم ومهندس ميكروويف. في عام ١٩٤٥، مبينما كان يزور معمل اختبار المغنطرون، انحنى سبينسر فوق مغنطرون يعمل فذابت الحلوى الموضوعة في جيب قميصه. أدرك سبينسر مباشرة ما حدث، فما كان إلا وقت قصير وقد جعل الفشار يتفرقع في المعمل وحتى قام بطهي بيضة إلى أن تفجرت. لم يعد الطهي كما كان منذ تلك اللحظة.

بأسرع ما يمكن. في هذه الحالة، سيواجه جزئ الماء عزماً وسيخضع لتسارع زاوي يجعله يدور نحو الاصطفاف. بينما يدور الجزيء فإنه سيصطدم بجزيئات أخرى ويحوّل بعضا من طاقته الكهروستاتيكية الكامنة إلى طاقة حرارية.

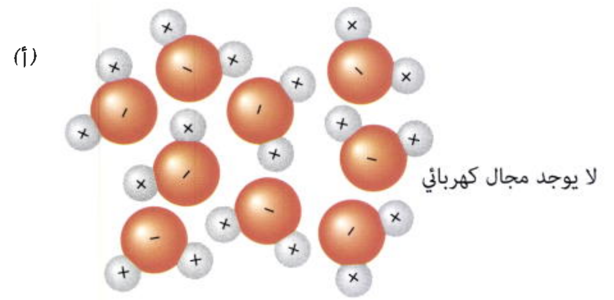
يحدث تأثير مشابه في حفل مزدحم عندما يُطلب من الجميع فجأة أن يواجهوا مقدمة الغرفة. يحتك الأشخاص ببعضهم البعض حينما يلتفون، ويحوّل احتكاك الانزلاق بعضا من طاقتهم إلى طاقة حرارية. إذا طُلب من الأشخاص أن يلتفوا للأمام وللخلف بشكل متكرر، سيصبحون دافئين. المثل ينطبق بالنسبة للماء. إذا عكس المجال الكهربائي اتجاهه عدة مرات، فإن جزيئات الماء ستلتف ذهابا وإيابا وستصبح أسخن وأسخن.

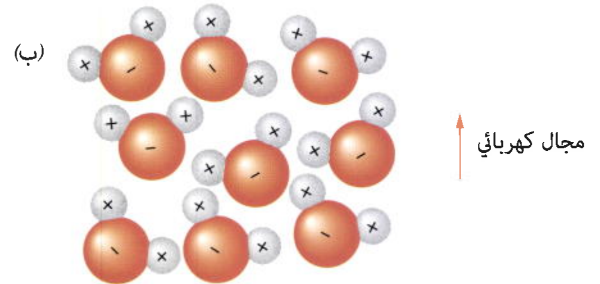
إن المجال الكهربائي المتذبذب للمايكروويف مناسب لتسخين الماء. يستخدم فرن المايكروويف موجات ميكروويف ذات 2.45 غيغاهيرتز (GHz2.45 أو 2,450,000,000Hz) للف جزيئات ماء الطعام ذهابا وإيابا، عدة بليونات من المرات في الثانية. بينما تدور جزيئات الماء، فإنها تصطدم ببعضها البعض وتسخن.

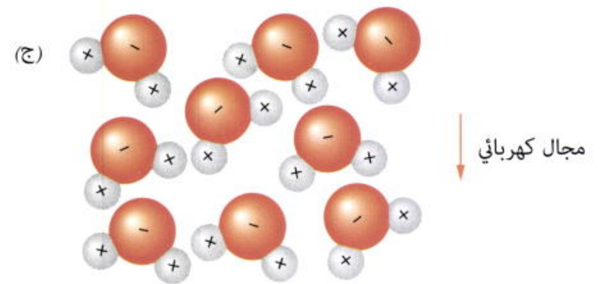
يمتص الماء موجات المايكروويف ويحوّل طاقتها إلى طاقة حرارية. لقد تم اختيار هذا التردد المعيّن ليس بسبب أي تأثيرات رنينية بل بسبب أنه لم يكن مستخدما في الاتصالات ولأنه يطهو الطعام بشكل منتظم. إذا كان التردد أعلى، فإن موجات المايكروويف كانت ستُمتص بشدة أكبر من قِبل الطعام ولن تخترق الأشياء الكبيرة لعمق كبير. أما إذا كان التردد أقل، فإن موجات المايكروويف ستمر خلال الأطعمة بسهولة ولن تطهو الطعام بكفاءة.

يُفسّر تأثير لف الجزيئات لماذا تُطهى فقط الأطعمة والأجسام المحتوية على الماء أو جزيئات قطبية أخرى جيدا في فرن المايكروويف. أطباق السيراميك، وأكواب الزجاج، والحاويات البلاستيكية خالية من الماء لذا في الغالب تظل باردة. حتى الجليد يصعب عليه امتصاص قدرة المايكروويف لأن تركيبه البلوري يقيد جزيئات الماء بحيث لا تستطيع الدوران بسهولة.

لكن في حين يذوب الجليد ببطء في فرن المايكروويف، يسخن الماء السائل الذي ينتجه بسرعة. يُفسّر سلوك التسخين المتميّز هذا لماذا يسهل حرق نفسك بالأطعمة المجمّدة التي سُخنت في فرن المايكروويف. تمتص أجزاء الطعام التي زال تجمّدها أولا معظم قدرة المايكروويف ويزيد تسخينها بينما يظل باقي الطعام مجمّداً وصلباً. لا تعرف إن كانت لقمتك التالية ستكسر أسنانك أو تحرق سقف حلقك. لحل هذه المشكلة، يكون للعديد من أفران المايكروويف دورات لفكّ تجميد الطعام والتي يتم فيها اعتراض عملية تسخين المايكروويف بشكل دوري للسماح للحرارة بالتدفق طبيعيا خلال الطعام لإذابة الجليد. بمجرد أن تذوب الأجزاء المجمّدة، فإنه يمكن لكل الطعام أن يمتص موجات المايكروويف.







W-0229

شكل ٢,٢,١٣: (أ) في الماء السائل، تكون جزيئات الماء عشوائية الاتجاه في ظل عدم وجود مجال كهربائي. (ب) و (ج) ولكن عند وجود مجال كهربائي، فإن اتجاه الجزيئات ينتظم بحيث يكون طرفها الموجب في اتجاه المجال.

تحقق من فهمك #١: فشار المايكروويف

(للإجابة، انظر صفحة ٤٣٤)

تحتوي نواة الفشار على نشا رطب داخل قشرة صلبة وجافة. يمكنك أن تحرق هذه القشرة بطهي الفشار في زيت حار لكن ليس عند طهيها في فرن المايكروويف. كيف يمكن لفرن المايكروويف أن يفرقع الفشار دون زيادة تسخين القشرة؟

دقق في أرقامك # ١: شراء الطعام

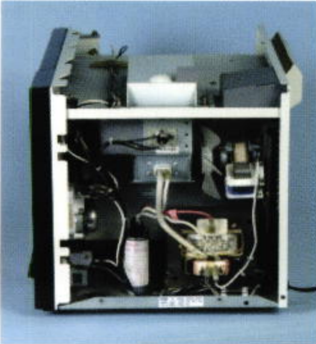
(للإجابة، انظر صفحة ٤٣٥)

الضوء الأحمر المستخدم في العديد من متاجر الأغذية عند موضع الدفع لقراءة الشفرة ينتج من ليزر الهيليوم – نيون. هذا الضوء هو موجة كهرومغنطيسية بطول موجي 633nm تقريبا. ما هو تردده؟

المعدن في فرن المايكروويف

على نقيض الاعتقاد الشائع، ليست الأجسام المعدنية غير متوافقة دائما مع أفران المايكروويف. في الواقع، جدران حجرة الطهي في الفرن معدنية، ومع ذلك لا تتسبب في حدوث أي مشكلة عندما تتعرض لموجات المايكروويف أثناء الطهي. مثل معظم الأسطح المعدنية، تعكس الجدران موجات المايكروويف. تقوم الجدران بعملية الانعكاس بالقيام بمثل عمل هوائيات الاستقبال والإرسال. تتسبب المجالات الكهربائية في موجات المايكروويف في تسريع الشحنات الحرة في أسطح المعدن وفي امتصاصها لموجات المايكروويف الأصلية. لكن حينما تتسارع هذه الشحنات، فإنها تبعث موجات مايكروويف جديدة. لموجات المايكروويف المنبعثة نفس تردد الموجات الأصلية، لكنها تسير في اتجاهات جديدة. لقد تم انعكاس موجات المايكروويف الأصلية من قِبل السطح.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٣،٢،١٣: يقع مصدر المايكروويف في مغنطرون هذا الفرن في منتصف الصورة، إلى يسار مروحة التبريد مباشرة. تسير موجات المايكروويف إلى حجرة الطهي من خلال الأنبوب المعدني المستطيل في أعلى الفرن. يوفّر المحوّل ذو الفولطية العالية الموجود أدنى اليمين قدرة كهربائية للمغنطرون.

تعكس جدران حجرة الطهي موجات مايكروويف الفرن وتبقيها في حالة ارتداد مستمر داخلها. حتى الشبكة المعدنية التي تُغطي نافذة الفرن تعكس موجات الميكروويف. ذلك لأن الشحنة لديها وقت كافٍ أثناء دورة موجة المايكروويف للتدفق حول كل ثقب في الشبكة وتعويض وجود الثقب. طالما أن الطول الموجي للموجة الكهرومغنطيسية أكبر بكثير من الثقوب في الشبكة المعدنية، فإن الموجة تنعكس تماما من عن تلك الشبكة. في الواقع، إذا لم يوجد أي شيء داخل الفرن لامتصاص موجات المايكروويف، فإنها سترتد داخله إلى أن تعود إلى مصدرها، وهو صمّام مفرغ يُسمّى مغنطرون (magnetron) (شكل ٣،٢،١٣)، وفي نهاية الأمر تتسبب في زيادة تسخينه.

في حين تُساعد الأسطح المعدنية في حصر موجات المايكروويف داخل الفرن، لطهي طعامك وليس طهيك أنت، إلا أن المعدن الإضافي داخل المايكروويف يمكنه أن يُحدث مشاكل. إذا لففت طعاماً بورق ألومنيوم، فإن الألومنيوم سيعكس موجات المايكروويف ولن يُطهى الطعام. ولكن سيُطهى الطعام بشكل جيّد نوعا ما إذا وضع في طبق معدني ضحل لأن موجات المايكروويف تدخل من المنطقة العلوية المفتوحة في الطبق مارة بالطعام ثم تنعكس فتمر بالطعام مرة أخرى.

في بعض الأحيان تقوم الشحنات الحرة في المعدن بأكثر من عكس موجات المايكروويف. إذا تم دفع شحنة كافية إلى حافة حادة في سطح معدن أو في قطعة ورق الألومنيوم، فإن بعض الشحنات ستقفز للهواء كشرارة. هذه الشرارة يمكنها أن تبدأ حريقاً، خصوصا عند اتصال الحافة الحادة بشيء قابل للاشتعال، مثل كيس بلاستيكي أو ورقي. كقاعدة مستخلصة من تجربة، لا تضع جسماً معدنياً حاداً في فرن المايكروويف.

بعض الأجسام المعدنية تسخن في فرن المايكروويف. عندما تدفع موجات المايكروويف الشحنة ذهابا وإيابا في المعدن، فإن المعدن يواجه تيارا مترددا. إذا كان للمعدن مقاومة كهربائية كبيرة، فإن هذا التيار المتردد سيواجه هبوطاً فولطياً ويُسخّن المعدن. في حين جدران الفرن وأواني الطبخ السميكة لها مقاومات منخفضة وتظل باردة، إلا أن الأشرطة المعدنية الرقيقة تسخن بشكل كبير بسرعة. الزخرفة المعدنية على أواني السيراميك معرّضة بشكل مخصوص للتلف في فرن المايكروويف، لذا، فإن تسخين القهوة في كوب جدتك ذي الحافة الذهبية بالتأكيد سيكون كارثة. عند وضع معدن في فرن المايكروويف تأكد من أنه سميك بما يكفي لتوصيل الكهرباء بشكل جيّد وأنه خالٍ من الحواف الحادّة.

إن المقاومة الحرارية في الأجسام الموصّلة يمكنها أن تكون مفيدة في بعض الأحيان. بما أن أفران المايكروويف تطهو الطعام من الداخل والخارج في الوقت نفسه، فإن سطح الطعام لا يُصبح أكثر سخونة ولا يحمرّ الطعام ولا يًصبح هشّا. لتحسين سطح الطعام ومظهره، فإن بعض الأطعمة تأتي بأغلفة خاصة توصل تيارا كافيا لكي تًصبح ساخنة جدا في فرن المايكروويف. توفّر هذه الأغلفة درجات الحرارة المرتفعة لسطح الطعام اللازمة لتحميره.

خاصية أخرى مميّزة لأفران المايكروويف هي أنها لا تطهو الطعام دائما بشكل متساوٍ. ذلك لأن سعة المجال الكهربائي للميكروويف ليست منتظمة في كافة أنحاء الفرن. حينما ترتد موجات المايكروويف داخل حجرة الطهي، تمر خلال نفس النقطة عدة مرّات من اتجاهات مختلفة في نفس الوقت. عندما تقوم بذلك، فإنها تظهر تأثيرات تداخل الموجات (انظر قسم ٩-٣). في أحد المواضع، قد تُشير المجالات الكهربائية الفردية في نفس الاتجاه وتواجه تداخلا بنّاء، بحيث يسخن الطعام في هذا الموضع بسرعة. لكن في موضع آخر، قد تشير هذه المجالات في اتجاهات متعاكسة وتواجه تداخلا هدّاماً، بحيث لا يُطهى الطعام تماماً في هذا الموضع.

إذا لم يكن أي شيء يتحرك في فرن المايكروويف، فإن نمط المايكروويف داخله لا يتحرك أيضا. إذاً سيكون هناك مناطق تكون فيها سعات المجال الكهربائي كبيرة جدا ومناطق السعات فيها صغيرة جدا. كلما كبرت سعة المجال الكهربائي، طها الطعام بشكل أسرع.

لتسخين الطعام بشكل منتظم في مثل هذا المايكروويف، فإن عليك أن تُحرك الطعام أثناء طهيه. إن العديد من الأفران لها قرص دوّار داخلها يُحرك الطعام تلقائيا. حل آخر لهذه المشكلة هو تحريك موجات المايكروويف داخل الفرن بواسطة مجداف معدني دوّار. يتغيّر نمط موجات المايكروويف داخل الحجرة أثناء دوران المجداف فيُطهى الطعام بالتساوي. وبعض أفران المايكروويف الأخرى لها ترددان منفصلان لموجات المايكروويف لطهي الطعام. بما أن هذين الترددين يطهوان الطعام بشكل مستقل، فإنه من غير المحتمل أن يتم الإغفال عن جزء من الطعام من كلا الموجتين في الوقت ذاته.

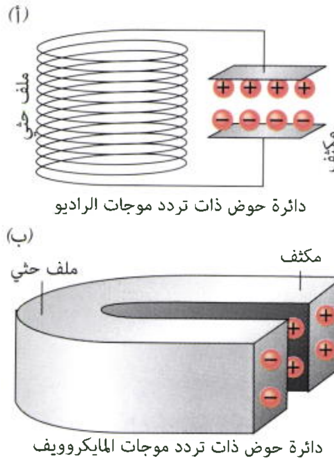
تحقق من فهمك # ٢: نصف ونصف (للإجابة، انظر صفحة ٤٣٤)

تقوم بوضع حاجز معدني سميك في فرن مايكروويف، بحيث يقسم حجرة الطهي بالمنتصف تماما. يُرسل الفرن أشعة المايكروويف داخل النصف الأيمن من الحجرة. إذا وضعت طعاماً في النصف الأيسر من الحجرة، هل سيُطهى؟

إنشاء موجات مايكروويف بواسطة مغنطرون

من الواضح أن المجالات الكهربائية المتغيرة تطهو الطعام أثناء ارتداد موجات المايكروويف داخل فرن. لكن كيف تنشأ موجات المايكروويف هذه؟ من القسم السابق عن المذياع، قد تعتقد أن الفرن يكوّن تيارا مترددا بتردد2.45 GHz وأن هذا التيار يتسبب في أرجحة الشحنة في دائرة رنين وحركتها لأعلى وأسفل هوائي. هذا تقريبا ما يحدث في الواقع داخل أنبوب المغنطرون.

المغنطرون هو أنبوب مُفرّغ خاص – حجرة مجوّفة أُفرغ منها جميع الهواء. يتألف المغنطرون في الأساس من أجزاء معدنية



شكل ٤,٢,١٣: (أ) عند ترددات موجات الراديو يكون الملف الحثّي لدائرة الرنين ملفاً سلكياً ومكثّفها زوجاً من الألواح المنفصلة. (ب) عند ترددات موجات المايكروويف يكون الملف الحثّي لدائرة الرنين مجرد انحناء في شريط على شكل حرف C ومكثّفها أطراف ذلك الشريط.

وسيراميكية، ويستخدم حزمة من الإلكترونات لجعل الشحنات تتأرجح في عدد من دوائر رنين المايكروويف. لدوائر الرنين هذه ترددات رنينية مقدارها 2.45GHz، والتي هي تردد تشغيل الفرن. بمساعدة هوائي صغير جدا، يبعث المغنطرون موجات الميكروويف التي تطهو الطعام.

تُرتّب دوائر الرنين في المايكروويف على شكل حلقة حول الصمام المفرغ للمغنطرون. لكي تتذبذب إحدى دوائر الرنين طبيعيا بتردد 2.45GHz، فإنه يجب أن يكون لمكثّفها سعة صغيرة جدا ولملفها الحثّي محاثّة صغيرة جدا. هذه الشروط يمكن أن تتحقق بواسطة شريط معدني على شكر حرف C (شكل ٤,٢,١٣). يُشكّل منحنى الشريط الملف الحثّي وأطرافه المكثّف.

تتأرجح الشحنة ذهابا وإيابا في الشريط ذي الشكل C كما يحدث في دائرة رنين تقليدية (شكل ٢,١,١٣). يُعرف هذا الشريط بالتجويف الرنيني وهو متذبذب توافقي إلكتروني آخر وبالتالي له زمن دوري لا يعتمد على مقدار الشحنة المتأرجحة.

في العادة يحتوي مغنطرون فرن المايكروويف على ثمانية من هذه التجويفات الرنينية، كل منها ضُبط بعناية من حيث الحجم والشكل لكي يقع ترددها الرنيني عند 2.45GHz تماما. بما أن هذه التجاويف مرتّبة في حلقة وكل منها يتشارك بأطرافه مع التجويفات المجاورة، فإنها تميل للتذبذب بشكل تبادلي (شكل ٥,٢,١٣). عند بداية دورة تذبذبية، فإن نصف الأطراف المعدنية مشحونة بشحنة موجبة والنصف الآخر بشحنة سالبة (شكل ٥,٢,١٣ أ). تبدأ التيارات بالتدفق خلال الحلقة وتُنتج مجالات مغنطيسية في التجاويف الرنينية (شكل ٥,٢,١٣ ب). تدفع هذه المجالات المغنطيسية التيارات حول الحلقة حتى بعد اختفاء الشحنات المنفصلة. تظهر الشحنات المنفصلة مرة أخرى لكن بتبادل الأطراف الموجبة والسالبة (شكل ٥,٢,١٣ ج).

تتذبذب هذه التيارات ذهابا وإيابا حول التجاويف بتردد 2.45GHz، فتملأ المغنطرون بمجالات كهربائية ومغنطيسية مترددة. لكن بينما تُنتزع الطاقة من هذه المجالات لطهي الطعام أو تُفقد نتيجة خلل في موصلية التجاويف ذاتها، فإن شيئا ما يجب أن يُغذي الطاقة بشكل مستمر. هذا التعويض في القدرة يتم توفيرها للتجاويف عن طريق أربعة مسارات من الإلكترونات ذات الطاقة العالية.

عند مركز أنبوب المغنطرون، يوجد مهبط محاط بفراغ يُسخّن كهربائيا ويميل لإصدار إلكترونات (شكل ٦,٢,١٣ أ). يضخ مزوّد طاقة ذو فولطية عالية شحنة سالبة على المهبط بحيث يشير نحوه مجال كهربائي قوّي يبدأ من أطراف التجويف الموجبة الشحنة. إذا لم توجد أي مجالات أخرى في المغنطرون، فإن إلكترونات سالبة الشحنة ستخرج من المهبط الساخن وتتسارع نحو الأطراف المشحونة بشحنة موجبة على هيئة أربعة مسارات إلكترونية (شكل ٦,٢,١٣ ب).

ولكن المغنطرون يحتوي أيضا على مغنطيس دائم كبير. وإلا لماذا إذاً يُسمّى مغنطروناً؟ يكوّن هذا المغنطيس مجالا مغنطيسيا قوياً ثابتا يشير للأعلى على طول محور المغنطرون، أي موازيا للمهبط ذاته (شكل ٦.٢.١٣ ج). إذا لم توجد أي مجالات أخرى داخل المغنطرون، فإن الإلكترونات ستواجه فقط قوى لورنتز عمودية على سرعاتها وستدور حول خطوط الفيض المغنطيسي في حلقات عكس عقارب الساعة - وهو سلوك يُعرف بحركة السيكلوترون (cyclotron). ستظل الإلكترونات الملتفة بالقرب من المهبط ولن تقترب أبدا من التجاويف.

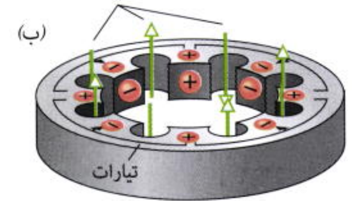
لكن في المغنطرون الحقيقي، يوجد المجال الكهربائي الموضح في الشكل (٦,٢,١٣ ب) والمجال المغنطيسي الموضح في الشكل (٦,٢,١٣ ج) في وقت واحد. بما أن كلا المجالين يبذل قوى على الإلكترونات المتحركة، فإن المسارات التي تتبعها الإلكترونات معقدة جدا (شكل ٦,٢,١٣ د). يندمج التحرّك للخارج والتحرك الدوراني سوية في أربع حزم إلكترونية والتي تتقوّس للخارج وتدور عكس عقارب الساعة، مثل أسلاك عجلة دراجة

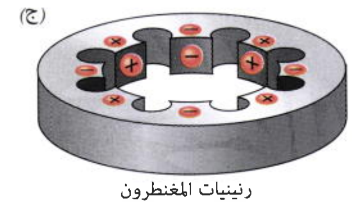
تدور. لا تصل حزمة إلكترونات كل تجويف عند طرفه المشحون بشحنة موجبة، كما سيحدث بدون وجود مجال مغنطيسي، بل تصل عند طرفه المشحون بشحنة سالبة. في الواقع تزيد حزم الإلكترونات للشحنات المنفصلة في التجاويف!

تندفع الحزم الإلكترونية حول المهبط بشكل متزامن تماما مع الشحنة المتذبذبة على التجاويف. تتدفق الحزم من طرف لطرف آخر في نفس مقدار الزمن اللازم للشحنة المنفصلة على الأطراف أن تنعكس. نتيجة لذلك، تصل الحزم دائما للطرف المشحون بشحنة سالبة. بزيادة الشحنة المنفصلة، توفر الحزم الإلكترونية قدرة لتذبذبات التجاويف، فتبقيها مستمرة وتسمح لها بنقل القدرة إلى الطعام. في الحقيقة، تبتدئ الحزم الإلكترونية التذبذبات في التجاويف بإضافة طاقة لتذبذبات عشوائية صغيرة موجودة دائما في النظم الكهربائية. لكن كيف تُنشئ الشحنة المتذبذبة داخل المغنطرون موجات مايكروويف داخل حجرة الطهي في الفرن؟

هناك طرق كثيرة لاستخراج موجات مايكروويف من حلقة التجاويف. إحدى طرق الاستخراج هي إدخال ملف سلكي ذي لفة واحدة في أحد تجاويف المغنطرون. بينما يتغيّر المجال المغنطيسي في ذلك التجويف، فإنه يحث تيارا مترددا تردده 2.45GHz في الملف. يتصل أحد طرفي هذا الملف بالحلقة لكن الطرف الآخر يخرج من المغنطرون من خلال ثقب في الحلقة محكم ومعزول ويتصل بهوائي ذي ربع طول موجي. يبعث هذا الهوائي والذي طوله 3cm (1.2in) موجات مايكروويف خلال أنبوب معدني متّصل بحجرة الطهي. تنعكس موجات المايكروويف في طريقها خلال الأنبوب إلى أن تصل لحجرة الطهي، حيث تطهو الطعام.





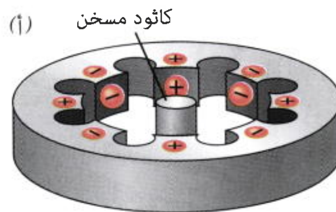


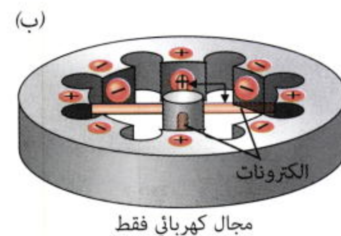
شكل ٥,٢,١٣: للمغنطرون الاعتيادي ثمانية تجاويف رنينية على شكل حرف C مرتبة في حلقة. (أ) الشحنات المنفصلة على أطراف التجاويف (ب) تتدفق كتيارات خلال الحلقة و(ج) تنعكس. أثناء تدفق التيارات، تظهر مجالات مغنطيسية في التجاويف الثمانية، مشيرة بالتبادل للأعلى وللأسفل.

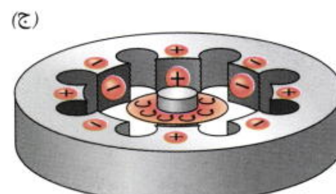
تحقق من فهمك # ٣: حجم توفيري كبير

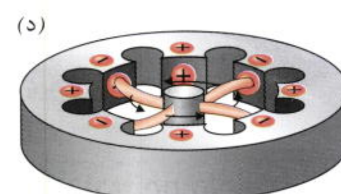
(للإجابة ، انظر صفحة ٤٣٤)

إذا صنع مصنّع مغنطروناً أكبر قليلا من الطبيعي في جميع أبعاده، كيف سيتصرف ذلك المغنطرون؟









شكل ٦,٢,١٣: (أ) تنبعث إلكترونات من المهبط الساخن في مركز حلقة التجاويف الرنينية للمغنطرون. (ب) المجالات الكهربائية وحدها ستسرّع الإلكترونات نحو أطراف التجويف الموجبة الشحنة. (ج) المجال المغنطيسي وحده (مشيرا للأعلى) سيجعل الإلكترونات تدور حول المهبط في حلقات عكس عقارب الساعة. (د) سوية، تكوّن هذه المجالات حزم إلكترونية على شكل أسلاك عجلة دراجة والتي تدور حول المهبط بعكس عقارب الساعة وتصطدم دائما بأطراف التجاويف السالبة الشحنة.

خاتمة الفصل الثالث عشر

فحص هذا الفصل جهازين شائعين مستندين على الموجات الكهرومغنطيسية. في قسم المذياع، رأينا أنه يمكن إنشاء الموجات الكهرومغنطيسية بتسريع الشحنة الكهربائية وأنه يمكن استشعار هذه الموجات بالبحث عن تأثيراتها على شحنات كهربائية أخرى. لقد فحصنا أيضا التقنيات المستخدمة لإرسال إشارات مذياع خلال الفراغ من خلال التحكّم بسعة أو تردد الموجات الكهرومغنطيسية.

في قسم أفران المايكروويف، استكشفنا الطرق التي يمكن للموجات الكهرومغنطيسية أن تتفاعل بها مباشرة مع جزيئات الماء القطبية وتنقل من خلالها طاقة إلى هذه الجزيئات. كما رأينا كيف أن التفاعلات بين موجات المايكروويف وجسم معدني يمكنها أن تؤدي إلى انعكاس أو شرارة أو تسخين. وفحصنا التقنية المستخدمة في الأفران لتكوين إشعاع مايكروويف عالي القدرة.

تفسير: غلي الماء في كأس جليدية

إن جزيئات الماء في الجليد مثبّتة بصلابة في مكانها بواسطة تركيب الجليد البلوري. نتيجة لعدم قدرة جزيئات الماء على التحرك أو الدوران، فإنها لا تستطيع متابعة المجال الكهربائي لإشعاع المايكروويف والمتغيّر بشكل سريع. نتيجة لذلك، لا يستطيع الجليد امتصاص طاقة كثيرة من إشعاع المايكروويف.

على النقيض من ذلك، يمكن لجزيئات الماء السائل أن تتحرك بحرية نسبية وتدور ذهابا وإيابا مع المجال الكهربائي المتغيّر لموجات المايكروويف. تمتص جزيئات الماء هذه طاقة من إشعاع المايكروويف وتُصبح أسخن، فترتفع درجة حرارة الماء السائل. في حين تميل الحرارة إلى التدفق من الماء الساخن إلى الجليد، إلا أن الماء ليس موصّلاً جيّداً للحرارة. يتوقف الحمل عن العمل بمجرّد أن ترتفع درجة حرارة الماء فوق $4^{\circ}C$ فيبدأ الماء الأكثر سخونة بالطفو على الماء الأبرد تحته. في الظروف الجيّدة، يمكن أن يبدأ الماء بالغليان قبل أن يُذيب كأس الجليد التي تحتويه.

ملخص الفصل

كيفية عمل المذياع

يكوّن مُرسل المذياع موجة راديو عندما تتسارع شحنات كهربائية لأعلى وأسفل هوائيه. للحصول على أكبر شحنة متحركة ممكنة، يصل المُرسل دائرة رنين إلى الهوائي ويُضيف ببطء طاقة لدائرة الرنين تلك إلى أن تتدفق كميات هائلة من الشحنة لأعلى وأسفل الهوائي. إذا كان طول الهوائي ربع طول الموجة، فإنه سيكون أيضاً في حالة رنين عند تردد الإرسال وسيزيد من مقدار الشحنة المتأرجحة للأعلى والأسفل.

يستشعر مستقبل المذياع موجة الراديو هذه عندما تتسبب في تسريع الشحنة لأعلى وأسفل هوائي الاستقبال. إذا كان كلٌّ من هوائي الاستقبال ودائرة رنين الاستقبال في حالة رنين مع تردد الإرسال، فإن كميات كبيرة من الشحنة ستتأرجح ذهابا وإيابا في دائرة رنين المستقبل وسيستشعر المستقبل الإرسال.
يمكن لموجة الراديو هذه أن تُمثّل الصوت باستخدام إما تقنية AM أو FM. في تقنية AM، تُزاد أو تُنقص شدة الموجة لتمثيل انضغاطات أو تخلخلات الهواء، على التوالي. في تقنية FM، يُزاد أو يُنقص التردد الدقيق للإرسال لتمثيل تلك الانضغاطات والتخلخلات.

كيفية عمل أفران المايكروويف

يستخدم فرن المايكروويف موجات المايكروويف لطهي الطعام. ترتد موجات المايكروويف هذه داخل حجرة الطهي، حيث تنقل طاقة لجزيئات الماء في الطعام. بما أن جزيء الماء قطبي، أي له طرف موجب وطرف سالب، فإنه يميل للاصطفاف مع المجال الكهربائي. يتسبب المجال المغنطيسي المتذبذب لموجات المايكروويف في دوران جزيئات الماء المجمّعة بإحكام ذهابا وإيابا بسرعة، فتسخّن التصادمات الناتجة الماء وتطهو الطعام.

تنتج موجات مايكروويف الفرن بواسطة مغنطرون، وهو صمّام مفرغ يحتوي على تجويفات رنينية ومهبط ساخن. بدمج مجالات كهربائية ومغنطيسية قوّية، يُنتج المغنطرون حزماً إلكترونية قوية تضيف طاقة للشحنة المتذبذبة في التجاويف. تستخلص حلقة سلكية وهوائي قصير قدرة من التجاويف الرنينية وتبعث موجات المايكروويف التي من ثم تطهو الطعام.

قوانين ومعادلات مهمة

١. الطاقة في المجال الكهربائي: طاقة المجال الكهربائي تساوي مربع شدة ذلك المجال مضروبا في حجم المجال، مقسوما على 8π مضروبا في ثابت كولوم، أو (١٣،١،١)

$$\text{الطاقة} = \frac{\text{المجال الكهربائي}^2 \times \text{الحجم}}{8\pi \times \text{ثابت كولوم}}$$

٢. العلاقة بين الطول الموجي والتردد: حاصل ضرب تردد موجة كهرومغنطيسية في طولها الموجي هو سرعة الضوء، أو (١٣،٢،١)

سرعة الضوء = الطول الموجي × التردد

تحقق من فهمك - الإجابات

١٣-١ الراديو

١. مجال مغنطيسي.

لماذا: بما أن المجال الكهربائي المتغيّر يُنتج مجالا مغنطيسيا، فإن الألواح لها مجال مغنطيسي بينما يختفي مجالها الكهربائي.

٢. مقدار الشحنة التي يمكن للمرسل أن يحركها مباشرة على الهوائي وعنه صغير جدا لا يكفي لتكوين إشارة راديو قوّية.

لماذا: دائرة الرنين مفيدة لأنها تسمح للمرسل بتحريك شحنات أكثر. مثل عدم كفاءة الشوكة الرنّانة في إرسال موجات صوتية وحدها، فكذلك هوائي المذياع غير كفء لإرسال موجات راديو وحده. يمكنك أن تجعل الشوكة الرنّانة أعلى صوتا بإقرانها مع شيء يحدث رنيناً مع ترددها. وبالمثل، يمكنك أن تجعل هوائي المذياع يبعث موجة راديو أقوى بإقرانه مع دائرة رنين تحدث رنيناً عند تردده.

٣. عندما يكون الهاتف اللاسلكي بعيدا عن وحدة قاعدته، فإن موجاتهما الكهرومغنطيسية تصبح منتشرة بحيث يصعب عليهما التوصيل.

لماذا: القدرات المنبعثة من القاعدة والهاتف اللاسلكي صغيرة جدا، فيصعب استشعار موجاتهما نسبيا. طالما أن القاعدة والهاتف اللاسلكي قريبان من بعضهما، فإنهما قادران على استشعار موجات بعضهما البعض. لكن عندما تصبح المسافة بينهما كبيرة جدا، تصبح الموجات منتشرة جدا لا يمكن استشعارها فيُفقد الاتصال بين الهاتف اللاسلكي ووحدة القاعدة.

٤. يحجب النفق معظم موجات الراديو. بما أنه يصل مذياع سيارتك موجة متذبذبة صغيرة فقط، فإن المذياع يُنتج تذبذبات صغيرة فقط في كثافة الهواء مع سمّاعته.

لماذا: يجد مذياع AM صعوبة في التمييز بين إرسال بعيد يُمثّل موسيقى صاخبة وإرسال قريب يمثّل موسيقى ناعمة. في كلتا الحالتين، يستشعر المُستقبل مجرد تغييرات صغيرة في التيار المتحرك لأعلى وأسفل هوائي. ولهذا يجب أن ترفع صوت مذياع AM عندما تبتعد عن هوائي الإرسال أو عندما تدخل نفقاً.

٥. نعم، على الأقل من حيث المبدأ.

لماذا: يمتد عرض نطاق محطة إذاعة AM إلى 5000Hz أعلى وأدنى تردد حاملة الموجة، فيُسمح رسميا للمحطة بتمثيل ترددات صوتية بعلو 5000Hz. ولكن فعليا من المحتمل أن تُرشّح المحطة الأصوات التي لها ترددات اقل من ذلك لتجنب مخالفة اتفاقياتها بالخطأ.

١٣-٢ أفران المايكروويف

١. ينقل فرن المايكروويف حرارة لجزيئات الماء في النشا بحيث لا تُصبح القشرة أكثر سخونة من المادة التي بداخلها.

لماذا: تُسخّن بذرة الذرة المطهية في الزيت بالاتصال مع الزيت والإناء الساخنين. يمكنك بسهولة زيادة تسخين القشرة الخارجية وحرقها. لكن أفران المايكروويف تنقل الحرارة إلى جزيئات الماء داخل القشرة. لا يمكن زيادة تسخين القشرة لأن أسخن شيء تلامسه هو النشا داخل البذرة. عندما يُصبح ضغط البخار داخل البذرة عالياً بما فيه الكفاية، فإن القشرة تنكسر و«تفرقع» البذرة.

٢. لا.

لماذا: سيعكس الحاجز المعدني موجات المايكروويف ويمنعها من دخول النصف الأيسر من الفرن.

٣. سيعمل بتردد أقل من 2.45GHz .

لماذا: يُحدد تردد موجات المايكروويف المنبعثة من المغنطرون حصريا بالرنين الطبيعي لتجويفاته. إذا تم تكبير هذه التجويفات، فإن كلاً من محاثّات منحنياتها وسعات أطرافها ستزيد. ستقل تردداتها الرنينية وسيبعث المغنطرون موجات مايكروويف بتردد أقل.

دقق في أرقامك - الإجابات

١٣-١ الراديو

١. حوالي 0.00045J.

لماذا: بما أن 10,000V/m تكافئ 10,000J/C·m، فإن معادلة (١٣،١،١) تعطينا طاقة مجال مقداره 10,000V/m يشغل حجما مقداره $1.0m^3$ كالتالي:

$$\text{الطاقة} = \frac{(10.000J/C.m)^2 \times 1.0m^3}{8\pi \cdot 8,988 \times 10^9 N.m^2/C^2} = \frac{0.00045J^2}{N.m} = 0.00045J$$

في حين ذلك المقدار ليس طاقة كثيرة لكل متر مربع، فإن ضربة برق وحيدة يمكنها أن تُحرر طاقة المجال الكهربائي في بليون متر مكعب تقريباً. لا عجب أنها تُنتج صوتا عاليا!

١٣-٢ أفران المايكروويف

١. حوالي $4.74\ Hz \times 10^{14}$.

لماذا: بما أن حاصل ضرب تردد موجة كهرومغنطيسية في طولها الموجي يُساوي سرعة الضوء، فإن ترددها يساوي سرعة الضوء مقسومة على طولها الموجي:

$$\text{التردد} = \frac{299,792,458m/s}{20.000000633m} = 4.74x10^{14}Hz$$

تمارين

١. إذا سحبت مغنطيساً دائماً بسرعة من دائرة رنين، ما الشيء المحتمل حدوثه في تلك الدائرة؟

٢. هل ستؤثر السرعة التي ستسحب بها المغنطيس بعيدا عن دائرة الرنين (تمرين ١) على الزمن الدوري لتذبذب شحنتها؟

٣. تتكوّن دائرة الرنين من ملف حثّي ومكثّف. أعط تفسيرا ميسرا لكون المجال المغنطيسي في الملف الحثّي أقوى ما يمكن في اللحظة التي تصل فيها الشحنة المنفصلة في المكثف صفراً.

٤. الأسلاك المعدنية التي يصنع منها معظم دوائر الرنين لها مقاومات كهربائية. لماذا تمنع هذه المقاومات الشحنة من التذبذب إلى الأبد في دائرة الرنين، وماذا يحدث لطاقة دائرة الرنين مع مرور الوقت؟

٥. لإضافة طاقة لتذبذب الشحنة في دائرة رنين بهوائي، في أي لحظة أثناء دورة التذبذب يجب عليك أن تُقرّب عصا موجبة الشحنة من الهوائي؟

٦. توجد دائرتا رنين متطابقتان بهوائيين موضوعتان بالقرب من بعضهما البعض. فسّر لماذا يمكن للشحنة المتذبذبة في دائرة رنين واحدة أن تستمر في بذل شغل على الشحنة المتذبذبة في دائرة الرنين الأخرى؟

٧. يُنتج نظام الإشعال في سيارة شرارة لإشعال الوقود في المحرك. أثناء كل عملية إشعال شرارة، تتسارع الشحنات فجأة خلال شمعة إشعال وعبر الفجوة الضيقة لشمعة الإشعال. في بعض الأحيان تُحدث هذه العملية ضوضاء في استقبال المذياع. لماذا؟

٨. لتقليل الضوضاء في مذياع السيارة (انظر تمرين ٧)، يستخدم نظام الإشعال أسلاكاً رديئة التوصيل للكهرباء. تمنع هذه الأسلاك الشحنات من التسارع بسرعة. لماذا يُحسّن هذا التغيير استقبال المذياع؟

٩. تنقل المكونات الإلكترونية داخل الكمبيوتر شحنات من وإلى الأسلاك، غالبا متزامنة مع الساعة الداخلية للكمبيوتر. بدون وجود حواجز لحجب الموجات الكهرومغنطيسية، فإن الكمبيوتر سيعمل كمُرسل مذياع. لماذا؟

١٠. لحفظ القدرة في الكمبيوتر، فإن أسلاكه التي تتجاوز الآلاف تتجنب في الغالب الانعطافات الحادة. لماذا تُهدر الانعطافات الحادة في الأسلاك الحاملة للتيار القدرة؟

١١. تبعث الشمس حزمة من الإلكترونات والبروتونات عالية الطاقة والتي تُسمّى الرياح الشمسية. تُحبس هذه الجسيمات بشكل متكرر في المجال المغنطيسي للأرض، فتسير في مسارات حلزونية تأخذها نحو القطب المغنطيسي الشمالي أو الجنوبي. عندما تتجه الجسيمات نحو الشمال وتصطدم بذرات في الغلاف الجوي العلوي للأرض، فإن هذه الذرات تبعث ضوءاً نعرفه بالأرورا بوراليس أو الأضواء القطبية الشمالية. كما تشوّش هذه الجسيمات في استقبال المذياع. لماذا تبعث هذه الجسيمات موجات راديو؟

١٢. عندما تسير إشارة مذياع خلال كابل متحد المحور، فإن الشحنة تتحرك ذهابا وإيابا في كل من السلك المركزي والأنبوب المحيط. وضّح أن كلاً من المجالين الكهربائي والمغنطيسي موجودان في الكابل المتحد المحور.

١٣. إذا حركت عصا مشحونة بشحنة موجبة رأسيا للأعلى وللأسفل، فما هو استقطاب الموجة الكهرومغنطيسية التي تبعثها؟

١٤. إذا وضعت بوصلة مغنطيسية على طاولة ولففت إبرتها المغنطيسية أفقيا، فإن أقطابها المتسارعة ستبعث موجة كهرومغنطيسية. ما هو استقطاب تلك الموجة؟

١٥. في حين تزعم محطة إذاعة AM أنها تُرسل 50,000W من القدرة الموسيقية، فإن هذه في الحقيقة هي قدرتها المتوسطة. هناك أوقات ترسل المحطة فيها أكثر من هذه القدرة وأوقات ترسل أقل. فسّر ذلك.

١٦. عندما يكون جهاز استقبالك بعيدا جدا عن محطة إذاعة AM، فإنك لن تستطيع سماع سوى الأصوات المرتفعة من الإرسال. عندما يكون جهاز استقبالك بعيدا جدا عن محطة إذاعة FM، فإنك تفقد الصوت بالكامل مرة واحدة. فسّر أسباب هذا الاختلاف.

١٧. عندما تُعلن محطة إذاعة AM أنها تُرسل بتردد 950kHz، فإن هذه المقولة ليست دقيقة جدا. فسّر لماذا قد تكون المحطة تُرسل أيضا بتردد 948kHz و 954 kHz.

١٨. لمبنى الامباير ستايت (ناطحة سحاب في مدينة نيويورك الأمريكية) عدة هوائيات FM في أعلاها، والتي أضيفت جزئياً لتزيد من ارتفاع المبنى. هذه الهوائيات ليست طويلة جدا. لماذا تقوم الهوائيات القصيرة، والموضوعة عالية في الهواء، بعمل جيّد في إرسال موجات راديو FM؟

١٩. يمكن للسيراميك المسامي غير المزجج أن يمتص ماء ورطوبة. لماذا تكون غير مناسبة للاستخدام في فرن المايكروويف؟

٢٠. لماذا تكون معظم الوجبات الجاهزة التي تُسخّن بالمايكروويف مغلفة في أواني بلاستيكية بدلا من الألومنيوم؟

٢١. لماذا من المهم جدا أن يتوقف فرن المايكروويف عندما تفتح بابه؟

٢٢. قارن بين طريقة طهي البطاطا في فرن المايكروويف بطريقة طهيها في الفرن الاعتيادي.

٢٣. عندما تستمع لإذاعة FM بالقرب من المباني، فإن انعكاسات موجات الراديو يمكنها أن تجعل الاستقبال رديئاً في بعض المواقع. قارن هذا التأثير بمشكلة الطهي غير المتساوي في فرن المايكروويف.

٢٤. تُستخدم عاكسات على شكل أطباق لتوجيه موجات المايكروويف لتحقيق الاتصال بين المباني المجاورة. كثيراً ما تُصنع تلك العاكسات من شبك معدني. لماذا لا تُصنع من شرائح معدنية صلبة؟

٢٥. لماذا تكون المقابض المعدنية الرفيعة لأوعية الطعام الجاهز خطرة عند وضعها في فرن المايكروويف؟

٢٦. هل الوعاء السميك ذو حواف ملساء المصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ خطر عند وضعه في فرن المايكروويف؟

٢٧. السيكلوترون هو معجّل للجسيمات تم اختراعه في عام ١٩٢٩ من قِبل الفيزيائي الأمريكي أرنست لورانس. يستخدم السيكلوترون مجالات كهربائية لبذل شغل على أجسام مشحونة أثناء إتباعها مسارات دائرية في مجال مغنطيسي قوّي. كانت فكرة لورانس المتبصرة أن جميع الجسيمات تستغرق نفس مقدار الزمن لإكمال دورة واحدة، بغض النظر عن سرعتها أو طاقتها. هذه الحقيقة تسمح للسيكلوترون ببذل شغل على كل الأجسام في نفس الوقت حينما تدور سوية. كيف يمكن للإلكترون الأسرع أن يستغرق نفس الوقت الذي يستغرقه إلكترون أبطأ لإكمال دورة؟

٢٨. يمكن لجسيم مشحون يتحرك بسرعة عالية جدا في مجال مغنطيسي أن يشع أشعة سينية (X-rays)، وهو ظاهرة تُعرف بإشعاع السنكروترون (synchrotron). لماذا المجال المغنطيسي أساس لهذا الانبعاث؟

مسائل

1. ما مقدار الطاقة المحتواة في $1m^3$ من مجال كهربائي مقداره 1V/m (أو 1 N/C)؟

٢. ما مقدار الطاقة المحتواة في $1m^3$ من مجال كهربائي مقداره 10,000V/cm؟

٣. ما الحجم الذي يحتوي 1J من الطاقة لمجال كهربائي مقداره 1000N/C ؟

٤. ما الحجم الذي يحتوي 0.001J من الطاقة لمجال كهربائي 500V/m؟

٥. ما مقدار المجال الكهربائي المطلوب لحجم $1m^3$ لكي يحتوي على طاقة مقدارها 1J؟

٦. ما هو المجال الكهربائي الذي يحتوي على 0.05J من الطاقة في $10m^3$؟

٧. تردد موجة الراديو المنبعثة من هاتف لاسلكي هو 900MHz. ما هو الطول الموجي لتلك الموجة؟

٨. يستخدم نطاق إذاعة الأفراد (Citizens Band CB) موجات راديو بترددات قريبة من 27MHz. ما هي الأطوال الموجية لهذه الموجات وما الطول الذي يجب أن يكون عليه هوائي تلك الإذاعة ذو الربع الطول الموجي؟

٩. الموجات الكهرومغنطيسية في الضوء الأزرق لها ترددات قريبة من 6.5×10^{14} Hz. ما هي أطوالها الموجية؟

١٠. كثيراً ما يشير مشغلو المذياع الهواة لموجاتهم الراديو عن طريق الطول الموجي. ما هي الترددات التقريبية لنطاقات الراديو للهواة والتي لها أطوال موجية 160 m و15m و2m؟

١١. موجات الراديو المستخدمة في الهواتف الخلوية لها أطوال موجية مقدارها 0.36m تقريبا. ما هي تردداتها؟

الفصل ١٤

الضوء

في حين أن موجات الراديو وموجات المايكروويف مفيدة في الاتصالات ونقل الطاقة، إلا أن هناك جزءاً آخر من الطيف الكهرومغنطيسي أكثر أهمية ألا وهو الضوء. يحتوي الضوء على موجات كهرومغنطيسية ذات ترددات عالية جدا وأطوال موجية قصيرة جدا. إن ترددات الضوء عالية جدا بحيث لا تستطيع الهوائيات الاعتيادية أن تتعامل معها. بدلاً من ذلك، يُمتص الضوء وينبعث من الجسيمات المشحونة الفردية في الذرات أو الجزيئات أو المواد، وبسبب علاقته الخاصة بالجسيمات المشحونة في المادة، فإن الضوء مهم في الفيزياء والكيمياء وعلم المواد. علاوة على ذلك، يُعدّ الضوء إحدى الطرق الأساسية التي نتفاعل بها مع العالم من حولنا.

تجربة: فصل ألوان ضوء الشمس

نحن نرى الضوء لأنه يثير خلايا في أعيننا و هذه الإثارة هي مثال على مقدرة الضوء في التأثير على الكيمياء. ولأن أعيننا قادرة على التمييز بين الأطوال الموجية المختلفة للضوء، فإننا ندرك الألوان. ففي حين يظهر ضوء الشمس عادة وكأنه عديم الألوان، فذلك لأنه يحتوي على مزيجٍ غزيرٍ من الأطوال الموجية والتي تترجمه أعيننا كبياض، و لكن هناك حالات يصبح فيها ضوء الشمس منفصلاً إلى ألوانه المكوّنة له.

يمكنك مشاهدة هذا الانفصال في الألوان بالنظر إلى ضوء الشمس المار خلال زجاج كريستالي أو وعاء، أو بعكس ضوء الشمس من على قرص مدمج CD أو قرص فيديو رقمي DVD. أمسك بالجسم في ضوء الشمس المباشر ولاحظ الضوء

بإذن لو بلومفيلد

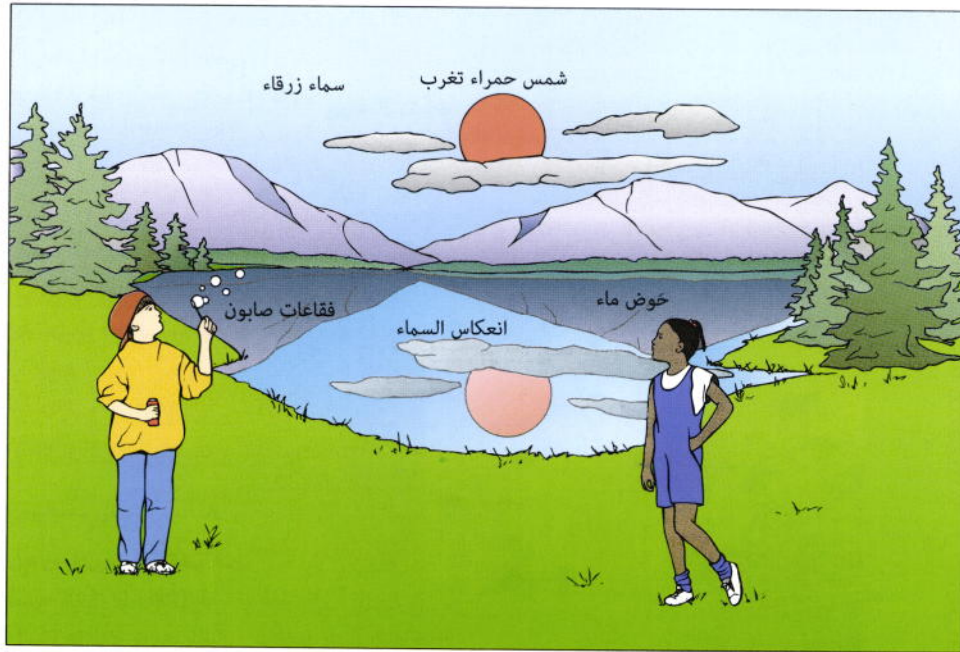


الذي يُعيد توجيهه نـحو عينيك أو يسقطه على ورقة بيضاء مجاورة. ففي حين أن بعض الضوء الذي تراه سيظل أبيضًا، إلا أنك سترى ألوانًا أيضًا.

أدر الجسم ببطء بيدك ولاحظ كيف تتغير الألوان. سترى تعاقباً تدريجياً للألوان من لون لآخر. تنبأ ترتيب الألوان التي ستراها ثم شاهد التعاقب الفعلي. هل كنت قادرا على التحقق من تنبئك؟ هل تعاقب الألوان دائما ثابت؟ كيف يرتبط هذا التعاقب مع ألوان قوس المطر؟ ما هي العلاقة بين هذا التعاقب والأطوال الموجية للضوء؟ هل يمكنك قياس المسافات البينية النسبية لألوان قوس المطر التقليدية: الأحمر والبرتقالي والأصفر والأخضر والأزرق والنيلي والبنفسجي؟

دليل الفصل

في هذا الفصل، سوف نفحص ثلاثة مصادر للضوء: (١) ضوء الشمس، و(٢) مصابيح التفريغ، و(٣) الليزر والدايودات الباعثة للضوء LED. في قسم ضوء الشمس، سنرى كيف يصل ضوء الشمس لأعيننا وكيف أن مساره خلال الغلاف الجوّي وقطرات المطر وفقاعات الصابون يمكن أن يفصله لألوانه المكوّنة له. في قسم مصابيح التفريغ، سنستكشف الطرق التي تبعث وتمتص بها الذرات والجزيئات الضوء، وكيف يمكن استخدام الذرات والجزيئات المختلفة لإنتاج ضوء ذي ألوان مختلفة. في قسم الليزر والدايود الباعث للضوء LED، سنرى كيف يمكن للذرات والجزيئات والجوامد أن تُضاعف أو تضخّم الضوء المار خلالها وبالتالي تُنتج أشعة ذات شدة عالية لضوء بالغ الانتظام. أثناء دراسة هذه المصادر الضوئية الثلاثة، سنتعلم أيضا ثلاثة أنواع مختلفة من الضوء: الضوء الحراري، وضوء الرنين الذري، والضوء المترابط. للمزيد من المعلومات، اقلب الصفحات إلى ملخص الفصل في صفحة ٤٦٦.



١٤-١ ضوء الشمس

منذ آلاف السنين والناس يقيسون مرور الوقت بشروق الشمس وغروبها فوق الأفق. تبدو الشمس أولا كقرص أحمر في الشرق كل صباح، فترتفع كقرص أبيض في السماء الزرقاء، ثم تغيب كقرص أحمر مرة أخرى في الغرب. ضوء الشمس الذي نراه يستغرق حوالي *8* دقائق ليقطع مسافة *150,000,000km* (*93,000,000* ميل) من الشمس إلى أعيننا، كما أنه يوفّر معظم الطاقة والحرارة التي تجعل الحياة على الأرض ممكنة. في حين أن الضوء في ضوء الشمس هو مجرد موجة كهرومغنطيسية أخرى، ويمكن اعتباره جزءاً من الفصل السابق، إلا أنه مهم جدا في حياتنا اليومية فيستحق اهتماما خاصا. ولذا سنبدأ بالنظر في كيفية تفاعل ضوء الشمس مع عالمنا.

أسئلة للتفكير

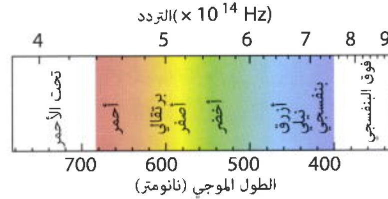
لماذا تكون الشمس حمراء عند الشروق والغروب؟ لماذا تكون السماء زرقاء أثناء النهار؟ لماذا يمكنك في بعض الأحيان رؤية أشعة شمس عندما يدخل ضوء الشمس في غرفة مظلمة من خلال نافذة صغيرة؟ لماذا نرى ألواناً عندما يمر ضوء الشمس خلال كريستال أو فقاعة صابون؟

تجارب يمكن القيام بها

في الواقع يتكوّن ضوء الشمس من موجات كهرومغنطيسية كثيرة مختلفة. و تختلف هذه الموجات من حيث التردد والطول الموجي مثلما تختلف موجات الراديو لمحطاتك الإذاعية المفضلة، و لكنك في حالة الضوء لا تحتاج لآلة لمساعدتك على التمييز بين الأطوال الموجية المختلفة؛ فيمكنك استخدام عينيك. انظر لفقاعة صابون في يوم مشمس ساطع. إنك ترى الفقاعة لأنها تعكس الضوء. في الواقع، تظهر الفقاعة الشفافة ملونة، رغم أن ضوء الشمس الساقط عليها أبيض. ذلك لأن الفقاعة تفصل ضوء الشمس تبعا للطول الموجي وتُرسل فقط أطوالاً موجية معينة نحو عينيك.

ضوء الشمس والموجات الكهرومغنطيسية

يمكن أن يكون للموجات الكهرومغنطيسية أي طول موجي، من آلاف الكيلومترات إلى جزء من عرض نواة ذرية. لموجات الراديو وموجات المايكروويف التي درسناها في الفصل السابق أطوال موجية أطول من 1mm. في هذا الفصل، سوف نهتم



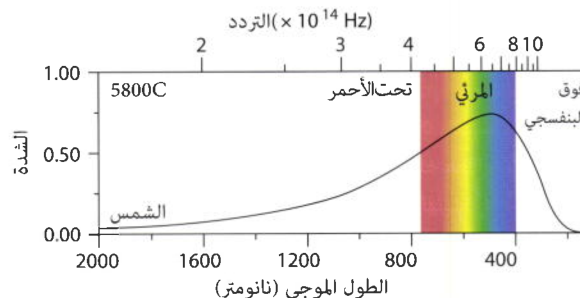
شكل 1.1.14: الجزء المرئي من طيف ضوء الشمس. كل طول موجي من الضوء المرئي له تردد معيّن ويرتبط بلون معيّن. عند طرفي الطيف المرئي يوجد الضوء تحت الأحمر وفوق البنفسجي غير المرئيين.

بالإشعاع ذي الأطوال الموجية الأقصر ، وعلى وجه الخصوص، سندرس موجات كهرومغنطيسية لها أطوال موجية بين 400nm و750nm (تذكر أن 1nm أو 1 نانومترهو 10^{-9}m). هذه هي الموجات الكهرومغنطيسية التي ندركها كضوء مرئي وهي المكوّنات الأساسية لضوء الشمس.

بما أن الموجات الكهرومغنطيسية في ضوء الشمس لها أطوال موجية قصيرة، فإن تردداتها تقع بين 10^{14}Hz و10^{15}Hz (شكل ١,١,١٤). بينما تمر إحدى موجات ضوء الشمس، فإن مجالها الكهربائي يتذبذب ذهابا وإيابا 1,000,000,000,000,000 مرة تقريباً كل ثانية. بما أن إنتاج موجات المايكروويف، والتي لها أطوال موجية أطول بكثير وترددات أقل بكثير، يتطلب مكوّنات متخصصة وهوائيات قصيرة جدا، فما الذي يمكنه أن يبعث ويمتص موجات الضوء؟ الجواب هو الجسيمات الفردية المشحونة في الذرات والجزيئات والمواد. هذه الجسيمات الصغيرة جدا يمكنها أن تتحرك بسرعة عالية، وكثيراً ما تهتز بترددات مقدارها 10^{14}Hz أو 10^{15}Hz أو حتى أكبر. حينما تتسارع هذه الجسيمات المشحونة ذهابا وإيابا، فإنها تبعث موجات ضوئية. بالمثل، تتسبب موجات الضوء العابرة في تسارع الجسيمات الفردية المشحونة في الذرات والجزيئات والمواد ذهابا وإيابا، وبالتالي تمتص موجات الضوء أيضا.

ينشأ ضوء الشمس عند السطح الخارجي للشمس، في منطقة تُسمّى بالكرة الضوئية (الفوتوسفير) (pho-tosphere). هناك تتصادم ذرات وأنظمة مشحونة صغيرة جدا (غالبا أيونات ذرية وإلكترونات) عند درجة حرارة 5800°C. وبما أن هذه الجسيمات المشحونة تتسارع أثناء ارتدادها، فإنها تبعث موجات كهرومغنطيسية.

إذًا يبعث سطح الشمس ضوءا من خلال الحركات الحرارية العشوائية لجسيماتها المشحونة، ولذلك فإن توزيع الأطوال الموجية التي يبعثها يتحدد فقط بدرجة حرارته. يبعث سطح الشمس طيف الجسم الأسود، مثل المصابيح الضوئية المتوهجة التي ناقشناها في قسم ٧-٣. وبما أن درجة حرارة الفوتوسفير هي 5800°C، فإن الحركات التصادمية سريعة جدا ويقع معظم ضوء الشمس في الجزء المرئي من الطيف الكهرومغنطيسي (شكل ٢,١,١٤).



شكل ٢,١,١٤: يأتي ضوء الشمس من فوتوسفير الشمس، حيث درجة الحرارة 5800°C. لهذا الضوء توزيع الجسم الأسود للأطوال الموجية، حيث معظم شدته مركّزة في الجزء المرئي من الطيف الكهرومغنطيسي الكلي.

ولكن ليس جميع ضوء الشمس مرئياً. حيث يوجد بجانب الأطوال الموجية الطويلة والترددات المنخفضة من الضوء المرئي الضوء تحت الأحمر. لا يمكننا رؤية الضوء تحت الأحمر بأعيننا ولكننا نشعر به عندما نقف أمام جسم ساخن. وينتج الضوء تحت الأحمر في ضوء الشمس من شحنات تتسارع ذهابا وإيابا بسرعة أبطأ من المتوسط.

بينما يوجد بجانب الأطوال الموجية القصيرة والترددات العالية من الضوء المرئي الضوء فوق البنفسجي. لا يمكننا رؤية الضوء فوق البنفسجي أيضا، ولكننا ندرك وجوده لأنه يحُث على حدوث تلف كيميائي في الجزيئات. يتسبب الضوء فوق البنفسجي في حروق الجلد ويحفّز اسمراره. ينتج الضوء فوق البنفسجي في ضوء الشمس من شحنات تتسارع ذهابا وإيابا بسرعة أسرع من المتوسط.

تحقق من فهمك #١: وهج الشمعة الوردي (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

لماذا تبعث الشمعة المحترقة ضوءا مائلاً للحمرة أو الصفرة؟

مسار ضوء الشمس إلى الأرض

يسير ضوء الشمس من الشمس إلى الأرض بسرعة الضوء،ولكن ما الذي يُحدد سرعة الضوء؟ في الواقع، كما تعلمنا في قسم 2.4، أن سرعة الضوء هي أحد الثوابت الأساسية في الطبيعة بقيمة محددة في الفراغ وهي 299,792,458m/s. ففي حين يستطيع الشخص أن يُجادل بأن سرعة الضوء محددة بالعلاقات بين المجالين الكهربائي والمغنطيسي، إلا أن هذه الملاحظة لا تحدد المسؤولية. إذا كنت ستسأل بعده ما الذي يُحدد العلاقات بين المجالين المغنطيسي والكهربائي، فإن الإجابة ستكون سرعة الضوء.

بدلا من تبرير لماذا يسير ضوء الشمس بالسرعة التي يسير بها في الفراغ، دعنا ننظر ماذا يحدث له عندما يدخل منطقة ليست فراغاً. على كل، يصل ضوء الشمس في نهاية الأمر إلى الغلاف الجوّي للأرض وعند ذلك يحدث العديد من الأشياء المثيرة.

أولا: يتباطأ ضوء الشمس حينما يبدأ مجالاه الكهربائي والمغنطيسي بالتفاعل مع الشحنات الكهربائية في الغلاف الجوّي، حيث يستقطب الضوء الجزيئات التي يواجهها، وهي عملية تؤخر مرور الضوء وتقلل من سرعته. وبما أن معظم المواد الشفّافة تستجيب بقوة أكبر للمجال الكهربائي للضوء مقارنة بمجاله المغنطيسي، فإننا سنركّز على التأثيرات الكهربائية فقط. يُعرف المعامل الذي يبطأ به الضوء في المادة بمعامل انكسار المادة. يسير الضوء ببطء شديد خلال المواد التي يسهل استقطابها، حيث أن بعضها لها معاملات انكسار مقدارها 2 أو حتى 3. إن الهواء القريب من مستوى سطح البحر قابل للاستقطاب قليلاً فقط، ومعامل انكساره هو مجرد 1.0003. لذلك فإن التقليل في سرعة الضوء صغير جدا لا يكاد يُلاحظ، إلا أننا نلاحظ جسيمات الهواء المستقطبة التي تسبب ذلك. جسيمات الهواء المستقطبة هذه هي ما تجعل السماء زرقاء (شكل ٣,١,١٤).

تتكوّن الجسيمات في الهواء من ذرات وجزيئات فردية، ومجموعات صغيرة من الذرات والجزيئات وقطرات الماء والغبار. وعندما تمر موجة ضوء الشمس خلال أحد هذه الجسيمات، يصبح الجسيم مستقطباً. تتسارع شحنات الجسيم الكهربائية ذهابا وإيابا حينما يدفعها المجال الكهربائي لموجة ضوء الشمس، فتعيد هذه الشحنات بذاتها بعث موجة كهرومغنطيسية جديدة.

تكتسب هذه الموجة الجديدة طاقتها من الموجة الأصلية. في الواقع، يعمل الجسيم كهوائي صغير جدا، فيستقبل مؤقتا جزءاً من الموجة الكهرومغنطيسية ويعيد إرسالها مباشرة في اتجاه جديد. تُسمّى هذه العملية، والتي فيها يقوم جسيم صغير جدا بإعادة توجيه مسار موجة الضوء المارة، باستطارة رايلي، نسبة للفيزيائي البريطاني اللورد رايلي (جون وليام ستروت،

جالين راوول\شركة ماونتين لايت للتصوير



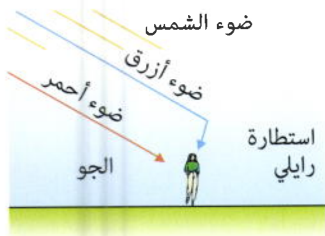


شـكل ٣،١،١٤: أثناء النهار، تبدو السماء فـوق وادي مونيومنت زرقاء لأن الغلاف الجوّي للأرض يتسـبب في استطارة ضوء أكـثره أزرق نـحونـا. في المسـاء، يذهب ضوء الشمس المُسـتطار ويصبح الغلاف الجوّي نافذة شـفّافة والتـي يمكننا من خلالها مشاهدة النجوم. يوضّح التصوير بالمرور الزمني في اليمين هذه النجوم على هيئة خطوط رأسية تقريبا في سماء الليل.

١٨٤٢ - ١٩١٩م) والذي كان أول من فهم هذه العملية ببعض التفصيل.

في حين يسير معظم ضوء الشمس مباشرة إلى أعيننا، إلا أن بعضه يخضع لاستطارة رايلي ويصل إلينا عبر مسارات أكثر تعقيدا. نـحن نرى الضوء المباشر آتياً من قرص الشمس الهائل، لكن الضوء المستطار يُعطي السماء بأكملها وهجا أزرق منتظما (شكل ٤،١،١٤). لكن لماذا هذا الوهج أزرق؟

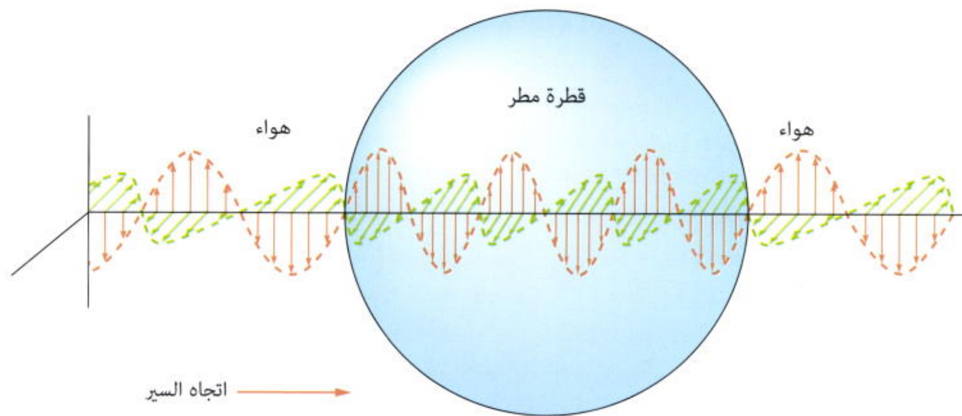
يأتي لون السماء الأزرق من كون جسيمات الهواء الصغيرة التي تُحدث استطارة رايلي لضوء الشمس صغيرة جدا لا تناسب أن تكون هوائيات جيّدة لذلك الضوء. لقد لاحظنا في قسم ١٣-١ أن الهوائي يعمل بشكل أفضل عندما يكون طوله ربع طول موجته الكهرومغنطيسية. تُعد جسيمات الهواء هوائيات سيئة خصوصا للضوء الأحمر ذي الطول الموجي الطويل، فنادرا ما يخضع ضوء الشمس الأحمر لاستطارة رايلي في طريقه خلال الغلاف الجوّي. لكن جسيمات الهواء ليست هوائيات سيئة للضوء الأزرق ذي الطول الموجي القصير حيث يستطير بعض ضوء الشمس الأزرق باستطارة رايلي ويصل لأعيننا من جميع الاتجاهات،فنرى هذا الضوء المستطار باستطارة رايلي كوهج السماء الأزرق.



شـكل ٤،١،١٤:بينـما يمر ضوء الشـمس خلال الغلاف الجـوّي، يخضع بعض من ضوئـه الأزرق لاسـتطارة رايلي من على جسـيمات في الهـواء. نـحن نـرى هذا الضـوء الأزرق المعاد توجيهه كالسـماء الزرقـاء المنتـشرة. يصل الضـوء المتبقي إلى أعيننـا مبـاشرة من الشـمس ويميل لأن يكون أحمـر، خصوصا عند الشروق والغروب.

إن استطارة رايلي لا تجعل السماء زرقاء فقط، بل تجعل الشروق والغروب أحمرًا أيضًا. فبينما تشرق الشمس أو تغرب، فإن ضوءها يجب أن يسير مسافات طويلة خلال الغلاف الجوّي للأرض حتى يصل لأعيننا. إن مسار الضوء طويل جدا بحيث يستطير معظم الضوء الأزرق باستطارة رايلي لأميال بعيدة شرقك أوغربك وكل ما تراه هو الضوء الأحمر المتبقي. في بعض الأحيان تظهر جميع السماء المحلية محمرة لأنه ببساطة لم يتبق أي ضوء أزرق ليُستطار باتجاهك. ويكون الشروق والغروب ملوّنين على وجه الخصوص عند وجود زيادة في الغبار أو الرماد في الغلاف الجوّي حيث تُعزّز استطارة رايلي. يميل تلوث الهواء، وحرائق الغابات، وثوران البراكين لتكوين شروقات وغروبات حمراء غير معتادة.

على النقيض من ذلك، يظهر السحاب والضباب أبيضين لأنهما يتكونان من قطرات ماء كبيرة نسبيا. إن هذه القطرات أكبر من الأطوال الموجية للضوء المرئي وتستطير كل الأطوال الموجية لضوء الشمس بالتساوي. وعلى الرغم من أن هذه الاستطارة فعّالة غالبا بحيث لا يمكنك رؤية قرص الشمس من خلال السحاب، إلا أنها لا تُعطي السحابة أي لون، فتبدو السحابة ببساطة بيضاء.



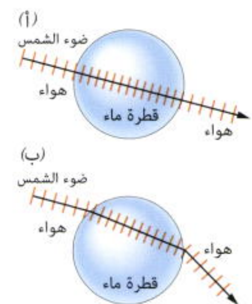
شكل ٥،١،١٤: بينما تدخل موجة كهرومغنطيسية إلى مادة، تتناقص سرعتها وتتقارب الموجات سوية، ويقل طولها الموجي.

تحقق من فهمك # ٢: رؤية الزرقة (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٨)

في الغالب يبدو الهواء مزرقاً في غرفة مظلمة مليئة بالدخان عند إضاءته بضوء أبيض. ما الذي يكوّن هذا المظهر المزرقّ؟

أقواس المطر

بعض الأحيان، تفصل قطرات الماء ألوان ضوء الشمس. عندما يسطع ضوء الشمس على قطرات مطر شفافة وكروية، فإن قطرات المطر هذه يمكنها أن تكوّن قوس مطر. لفهم كيف يمكن لكريات الماء الشفافة أن تحني مسار ضوء الشمس وتفصله وفقا للطول الموجي، علينا أن نفهم ثلاثة تأثيرات بصرية مهمة: الانكسار والانعكاس والتشتت. لقد واجهنا هذه الظواهر الموجية ذاتها حينما كنّا ندرس موجات سطح الماء في قسم ٩-٣، ولكنها تبدو الآن في إطار جديد: موجات ضوئية! دعنا نبدأ بالنظر لما يحدث عندما تمر موجة من ضوء الشمس مباشرة خلال قطرة مطر. بسبب أن الماء أكثر قابلية للاستقطاب من الهواء، فإن الموجة تتباطأ داخل قطرة المطر وتتقارب دوراتها سوية (شكل ٥،١،١٤). ففي حين يقلل تأثير التقارب من طول الضوء الموجي داخل القطرة، إلا أن تردد الضوء يظل دون تغير. لا تختفي الدورات بينما تمر خلال قطرة المطر، بل تتحرك بسرعة أبطأ.



شكل ٦،١،١٤: منظر جانبي لموجتين ضيقتين من ضوء الشمس تدخلان وتخرجان من قطرات مطر. تُمثّل الخطوط المرسومة عبر كل موجة ضوء قمم المجال الكهربائي للأعلى، وتتقارب سوية حينما يتباطأ الضوء في الماء.

إذا وجّهت موجة ضيقة من ضوء الشمس مباشرة خلال مركز قطرة مطر، فإنها ستتبع مسارا مستقيما وتخرج من الجانب الآخر غير متأثرة (شكل ٦،١،١٤ أ). ولكن إذا سقطت تلك الموجة بالقرب من أعلى قطرة المطر، فإنها ستنعطف عند دخولها للماء (شكل ٦،١،١٤ ب). بما أن الطرف السفلي من الموجة سيصل للماء أولا ويتباطأ، فالطرف العلوي سيتجاوزه وستنعطف الموجة للأسفل. إذا ستتجه الموجة بشكل مباشر إلى داخل الماء.

حينما تغادر الموجة في الشكل (٦،١،١٤ ب) قطرة الماء، يخرج طرفها العلوي أولا ويتسارع بينما يتخلّف عنه الطرف السفلي، فتنعطف الموجة مزيدا للأسفل وتسير بطريقة أقل مباشرية إلى داخل الهواء وبعيدا عن الماء.

هذا الانعطاف لضوء الشمس عند الحدود بين المواد هو انعكاس. يحدث الانعكاس كلما تغيرت سرعة ضوء الشمس عند مروره خلال طبقة حدّية بزاوية. إذا تباطأ ضوء الشمس عند طبقة حدّية، فإنه ينعطف ليسير بطريقة أكثر مباشرة إلى داخل المادة الجديدة. إذا تسارع ضوء الشمس عند طبقة حدّية، فإنه ينعطف ليسير بطريقة أقل مباشرية إلى داخل المادة الجديدة. إن مقدار الانعطاف يزيد بزيادة تغير السرعة.

لكن جزءاً من ضوء الشمس الساقط على الطبقة الحدّية لا يمرّ خلالها إطلاقا. بل ينعكس. في القسم ٩-٣، عزونا الانعكاس الموجي إلى التغيرات في سرعة الموجة عند الطبقة الحدّية على وجه الخصوص، ولكن السبب الأكثر شمولية لانعكاسات الموجة هو المعاوقة غير الموائمة - أي تغيّر مفاجئ في كيفية حركة الموجة خلال وسطها . عموما إن المعاوقة هي مقياس معارضة النظام لمرور تيار أو موجة. بالنسبة لنظام كهرومغنطيسي، تقيس المعاوقة مقدار الفولطية أو المجال الكهربائي اللازم لإنتاج تيار أو مجال مغنطيسي معين. بعبارة أخرى، تقيس المعاوقة الكهربائية صعوبة النشاط الكهربائي لإنتاج نشاط مغنطيسي. إن تأثيرات المعاوقة شائعة في الطبيعة (انظر ^١) وتنطبق أيضا على الموجات الميكانيكية والتيارات، فعندما تواجه الموجات الصوتية والمائية معاوقات غير موائمة، فإنها تنعكس جزئيا أيضًا.

إن معاوقة الفراغ مرتفعة لأنه لا يوجد ما يعين المجال الكهربائي فيه لإنتاج مجال مغنطيسي، ولكن داخل معظم المواد يجد المجال الكهربائي مساعدة، فيستقطب المجال الكهربائي المادة، والتي من ثم تساعد في إنشاء المجال المغنطيسي. بسبب هذه المساعدة، تكون معاوقة معظم المواد أقل بكثير من معاوقة الفراغ. وبما أن الهواء هو تقريبا فراغ، فإن الطبقة الحدّية بين الهواء والماء هي معاوقة غير موائمة للضوء.
إن المرور خلال معاوقة غير موائمة يؤدي إلى اضطراب التوازن بين المجالين الكهربائي والمغنطيسي لموجة الضوء. ولتعويض عدم التوازن هذا، يواجه جزء من الموجة الداخلة انعكاساً من على الطبقة الحدّية، وبالتالي ينعكس بعض ضوء الشمس كلما دخل أو خرج من قطرة ماء. تعتمد نسبة الضوء الذي ينعكس على شدة المعاوقة غير الموائمة ولكن في المعتاد هي 4 ٪ بين الهواء ومعظم المواد الشفافة، بما في ذلك الماء (للانعكاس من على الرمل، انظر ^٢) على النقيض، تُستقطب المعادن بسهولة بحيث تكون معاوقتها صفراً فتعكس الضوء تماما.

هناك نقطة أخرى مهمة عن مرور ضوء الشمس خلال الماء: يسير الضوء الأحمر خلال الماء بسرعة أكبر من سرعة الضوء البنفسجي بمقدار 1 ٪. ذلك لأن الضوء البنفسجي ذا التردد المرتفع يستقطب جزيئات الماء بسهولة أكبر من الضوء الأحمر ذي التردد المنخفض، وهذه الزيادة في الاستقطاب تُبطئ الضوء البنفسجي. إن اعتماد سرعة الضوء في المادة على التردد هو التشتت. يؤثر التشتت في الانكسار. فكلما تباطأ الضوء أكثر عند دخوله قطرة مطر، زاد انحناؤه عند المنطقة الحدية. وبما أن الضوء البنفسجي يتباطأ أكثر من الضوء الأحمر، فإن الضوء البنفسجي ينعطف أيضا أكثر، وتتبع الألوان المختلفة لضوء الشمس مسارات مختلفة بعض الشيء خلال قطرة المطر.

يتكوّن قوس المطر عندما تفصل قطرات المطر ضوء الشمس وفقا للألوان (شكل ٧،١،١٤). لرؤية قوس المطر، تقف والشمس في ظهرك وتنظر للأعلى إلى السماء. فعندما يسقط ضوء الشمس على قطرات المطر، فإنها تعيد توجيه بعض ذلك الضوء ليعود إليك. وبما أن كل قطرة مطر تعيد توجيه الضوء في مدى ضيق من الزوايا

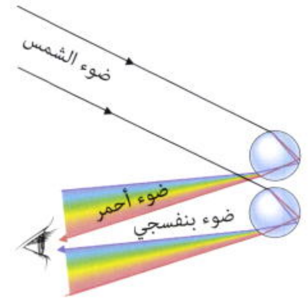
^١ عندما تسير الموجات الكهرومغنطيسية خلال أسلاك، فإنها تنعكس نتيجة معاوقات غير موائمة. تحدث عدم الموائمات هذه كلما تغيرت العلاقة بين المجالات الكهربائية والمغنطيسية ويجب تجنبها بعناية في تسليك التلفاز. إذا لم توفر جهاز معاوقة موائمة عند وصل سلك هوائي (300V) بمدخل كابل فيديو (75V)، فإنك ستحصل على انعكاسات في الأسلاك وصور مهزوزة على الشاشة.

^٢ يبدو الرمل أبيضًا لأنه يعيد توجيه ضوء الشمس في جميع الاتجاهات. أحد تفسيرات هذا التأثير هو أن ذرات الرمل تعمل كهوائيات صغيرة جدا تستجيب لموجات الضوء الكهرومغنطيسية وتعيد انبعاثها. تفسير آخر هو أن ذرات الرمل تُقدّم لضوء الشمس آلافاً من الطبقات الحدية بين الهواء والرمل لينعكس من عليها. لكن كلا التفسيرين وصف لنفس الفيزياء - الجسيمات المشحونة في ذرات الرمل تُستقطب كهربائيا من قِبل الموجات المارة خلالها. هذه الموجات يعاد توجيهها بشكل عشوائي دون أن تُمتص، وتُعطي الرمل مظهره الأبيض.

ستيف ساتوشيك\ذي إميج بنك الصور\جيتي إيميجز



شكل ٧،١،١٤: يتشكّل قوس المطر عندما تعكس قطرات الماء ضوء الشمس لتعيده نحو عينيك. وبما أن الأطوال الموجية المختلفة للضوء تتبع مسارات مختلفة قليلا، نرى الألوان المختلفة تأتي من اتجاهات مختلفة قليلا ونشاهد أقواساً من الألوان.



شكل ٨,١,١٤: بينما يمر ضوء الشمس خلال قطرات المطر الكروية، تنفصل ألوانـه. ينعطف الضوء البنفسـجي أكثر عنـد كل طبقة حدّية بين الهواء والمـاء من الضـوء الأحمـر، ويخرج الضـوءان مـن قطـرات المطر وهما يسـيران في اتجاهين مختلفين. فترى الضوء الأحمر يأتي نـحوك من قطرات المطر العلوية والضوء البنفسجي من قطرات المطر السفلية.

فقط، فإنك لا تستطيع رؤية الضوء من كل قطرة مطر. فقط قطرات المطر في قوس ضيّق في السماء تعيد توجيه الضوء المرئي باتجاهك، فيظهر هذا القوس ملونا ومتوهجا لأن قطرات الماء في الطرف الداخلي للقوس تُرسل ضوءا بنفسجيا باتجاهك، بينما قطرات المطر في الطرف الخارجي للقوس تُرسل ضوءا أحمر باتجاهك، وبينهما ترى جميع ألوان قوس المطر.

يوضح الشكل (٨,١,١٤) كيف تعيد قطرة المطر توجيه الألوان المختلفة للضوء في اتجاهات مختلفة. ففي حين يوجد احتمالات عديدة للمسارات التي يمكن أن يتخذها الضوء خلال قطرة المطر، إلا أن هذا المسار هو الذي يُنتج أقواس المطر. يدخل ضوء الشمس بالقرب من قمة قطرة المطر وينعطف للداخل. ينعطف الضوء البنفسجي أكثر من انعطاف الضوء الأحمر، فيبدأ ضوء الشمس بالانفصال وفقا للون. ينعكس بعض ضوء الشمس أيضا من قطرة المطر لكن لا يساهم في قوس المطر.

عندما يصطدم الضوء داخل قطرة المطر بالسطح الخلفي، فإن معظمه يغادر القطرة ويُفقد. لكن نسبة صغيرة من الضوء تنعكس من على ذلك السطح، وتستمر بالسير خلال قطرة المطر، وعندما يصل هذا الضوء للسطح الأمامي لقطرة المطر، فإن معظمه يغادر القطرة. ينعطف الضوء البنفسجي بشدة أكبر من الضوء الأحمر عندما يدخلان الهواء مرة أخرى، لذا فإن الألوان المختلفة تغادر القطرة في اتجاهات مختلفة. بما أن الضوء البنفسجي يُعاد توجيهه للأعلى أكثر من الضوء الأحمر، فإنك ترى الضوء البنفسجي يأتي باتجاهك من قطرات المطر السفلية. يُعاد توجيه الضوء الأحمر للأسفل أكثر فتراه يأتي نـحوك من قطرات المطر العلوية. وهكذا، فإن الجزء العلوي من قوس المطر أحمر بينما الجزء السفلي من القوس بنفسجي.

تحقق من فهمك #٣: منظر الألماس (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

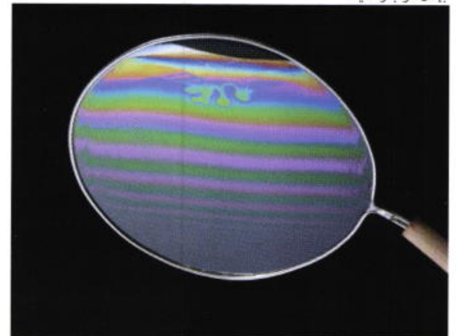
تتلألأ حلية الألماس المتدلية بالألوان عندما تنظر إليها في ضوء الشمس. من أين تأتي هذه الألوان؟

فقاعات الصابون

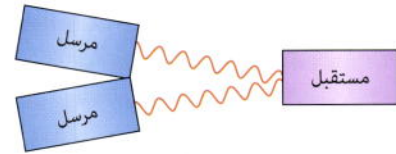
إن فقاعات الصابون أيضا تفصل ضوء الشمس لألوانه العديدة (شكل ٩,١,١٤)، لكنها تستخدم ظاهرة موجية أخرى: التداخل. لقد تعرضنا لتداخل الموجات الميكانيكية في قسم ٩-٣ عندما درسنا ضربات الموجة عند الشاطئ، وتعرضنا لتداخل الموجات الكهرومغنطيسية في قسم ١٣-٢ عندما درسنا طهي المايكروويف غير المتساوي. الآن سننظر للتداخل في نوع آخر من الموجات الكهرومغنطيسية: الضوء.

تنشأ تأثيرات تداخل الضوء من جمع أو تراكب موجاته الكهرومغنطيسية. عندما تتراكب عدة موجات ضوئية

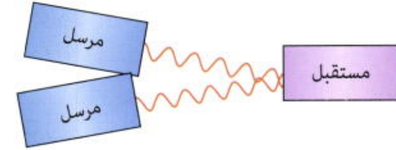
بإذن لو بلومفيلد



شـكل ٩,١,١٤: يتداخل الضوء المنعكس من على السطحين الأمامي والخلفي لهذا الغشاء الصابوني مع نفسه ويعطي الغشاء مظهره الملوّن. بما أن الألوان يُحددها سمك الغشاء وبما أن سمك الغشاء يزداد في الاتجاه السفلي، فإن الغشاء يعرض أشرطة أفقية من الألوان.

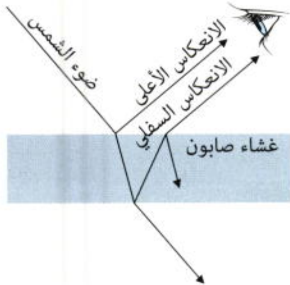


تداخل بناء



تداخل هدام

شكل ١٠,١,١٤: (أ) عندما تصل موجتان من مسارين منفصلين متفقتين في الطور، فإن التداخل البنّاء يُنتج تأثيرا كبيرا في المستقبِل. (ب) عندما تصل الموجتان مختلفتان في الطور، فإن التداخل الهدّام يُنتج تأثيرا ضعيفا في المستقبِل.



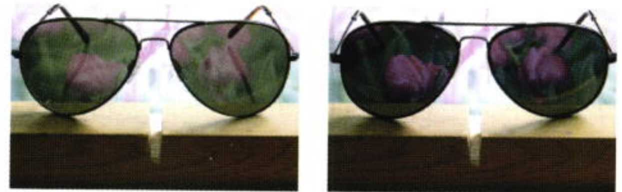
شكل ١١,١,١٤: ينعكس ضوء الشمس من على كل من السطحين الأمامي والخلفي لغشاء الصابون. يتأخر الانعكاس من السطح الخلفي عن الانعكاس من السطح الأمامي لأنه يجب أن يمر مرتين خلال غشاء الصابون ذاته. فإذا وصلت الموجتان المنعكستان متفقتان في الطور، سترى انعكاسا ساطعا، أما إذا وصلتا مختلفتان في الطور، سترى انعكاساً خافتاً.

في موقع معيّن، فإن مجالاتها الكهربائية تتجمّع سوية وكذلك مجالاتها المغنطيسية. إذا أشارت مجالاتها الفردية جميعها في نفس الاتجاه، فإن الموجات تواجه تداخلاً بنّاء – فتتجمّع سوية بطريقة تدعم بعضها بعضا وتُعزّز شدة الضوء عند ذلك الموقع (شكل ١٠,١,١٤ أ)، ولكن عندما تشير المجالات الفردية في اتجاهات متعاكسة، فإن الموجات تواجه تداخلاً هدّاماً – فتتجمّع سوية بطريقة تُلغي بعضها بعضا وتقلّ شدة الضوء عند ذلك الموقع (شكل ١٠,١,١٤ ب).

يحدث كلا نوعي التداخل عندما ينعكس ضوء الشمس من القشرة الخارجية لفقاعة الصابون. بينما تصطدم كل موجة من ضوء الشمس بذلك الغشاء الرقيق من الماء المصوبن، فإن السطح الأمامي للغشاء يعكس ٤٪ من الموجة ويعكس السطح الخلفي للغشاء 4٪ أخرى (شكل ١١,١,١٤)، وبما أن كلا الانعكاسين يسير في نفس الاتجاه، فإن الضوء المنعكس الذي تراه يصل لعينيك عن طريق مسارين مختلفين، مسار من كل انعكاس. إذا وصلت هاتان الموجتان متفقتي الطور، أي بكون مجاليهما الكهربائيين متزامنًا ويدعم أحدهما الآخر – ترى انعكاساً ساطعاً خاصاً بالتداخل البنّاء، أما إذا وصلت الموجتان مختلفتي الطور، أي بكون مجاليهما الكهربائيين يُلغي أحدهما الآخر – ترى انعكاساً خافتاً خاصا بالتداخل الهدّام.

إن كونك ترى تداخلا بنّاء أو هدّاما يعتمد على الطول الموجي لضوء الشمس. يجب على الانعكاس من السطح الخلفي أن يسير مرتين خلال غشاء الصابون، لذا يتأخر عن الانعكاس من السطح الأمامي. إذا كان التأخر بما يكفي للموجة أن تُكمل عدداً صحيحاً من الدورات، فإن الموجتين المنعكستين متفقتان في الطور مع بعضهما البعض حينما يسيران باتجاه عينيك فترى انعكاسا ساطعا. أما إذا سمح التأخر لانعكاس السطح الخلفي بأن يُكمل نصف دورة إضافية، فإن الموجتين المنعكستين مختلفتان في الطور مع بعضهما البعض فترى انعكاساً خافتاً.

يحتوي ضوء الشمس على أطوال موجية مختلفة من الضوء، وهذه الأطوال الموجية تتصرف بشكل مختلف أثناء عملية الانعكاس. إن الانعكاس الملون الذي تراه يتألف أساساً من تلك الموجات الضوئية التي تواجه تداخلا بنّاء. وبما أن التأخر الذي يواجهه الانعكاس من السطح الخلفي يعتمد على سماكة غشاء الصابون، فإنه يمكنك في الواقع أن تُحدد سمك الغشاء بدراسة ألوانه.



بإذن لو بلومفيلد

شكل ١٢،١،١٤: (أ) النظارات الشمسية المعتادة تعتم المنظر فحسب. (ب) النظارات الشمسية المستقطبة تحجب الضوء المستقطب أفقيا، والذي هو المكوّن الأساسي للوهج.

تحقق من فهمك #٤: بقعة زيت بارعة المظهر (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

تظهر طبقة رقيقة من الزيت أو الجازولين الطافية على ماء ساطعة الألوان في ضوء الشمس. من أين تأتي هذه الألوان؟

ضوء الشمس والنظارات الشمسية المستقطبة

تمتص جميع النظارات الشمسية بعضا من ضوء الشمس المار خلالها، لكن أفضلها تمتص الضوء المستقطب أفقيا بشدة أكبر من الضوء المستقطب رأسيا. هذه النظارات الشمسية المستقطبة تقلل الوهج بشكل كبير بإلغاء معظم الضوء المنعكس من على الأسطح الأفقية.

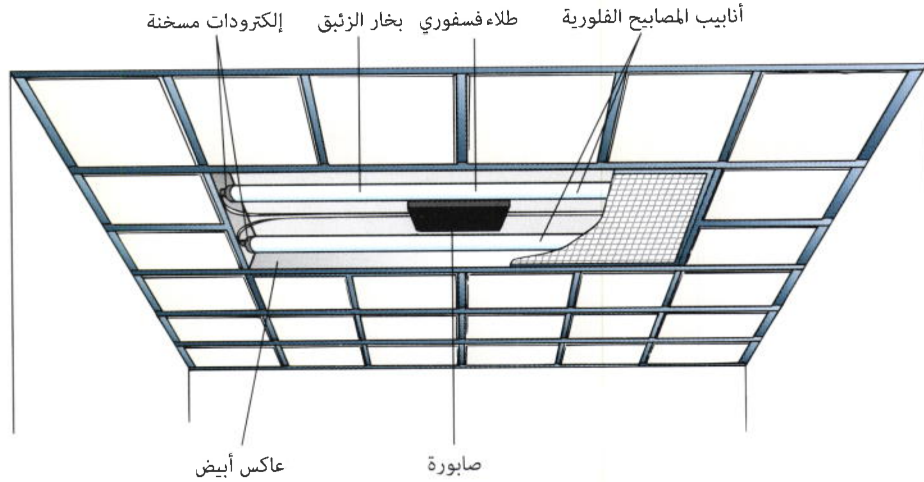
عندما يسقط الضوء على سطح شفّاف بزاوية قائمة، فإن 4٪ تقريباً من ذلك الضوء ينعكس، بغض النظر عن استقطابه ولكن عندما يسقط الضوء على سطح أفقي بزاوية ضحلة، فإن الضوء المستقطب أفقيا ينعكس بشدة أكبر بكثير من الضوء المستقطب رأسيا. وذلك لأن المجال الكهربائي الأفقي للضوء المستقطب أفقيا يدفع الشحنات الكهربائية ذهابا وإيابا على طول السطح. تنزاح الشحنات بسهولة في ذلك الاتجاه ويصبح السطح أكثر سهولة للاستقطاب عندما تصبح الزاوية أكثر اضمحلالا. ونتيجة لذلك، يعكس السطح ضوءا مستقطبا أفقيا أكثر عند الزوايا الضحلة مقارنة بالزوايا الحادة.

لكن المجال الكهربائي الرأسي للضوء المستقطب رأسياً يدفع الشحنات الكهربائية رأسيا للأعلى وللأسفل. وعند الزوايا الضحلة، يعمل هذا المجال على رفع الشحنات من وإلى سطح أفقي. وبما أن الشحنات لا يمكنها مغادرة السطح، يصبح السطح أكثر صعوبة للاستقطاب حينما تصبح الزاوية أكثر ضحالة. إن السطح الأفقي لا يعكس كثيرا من الضوء المستقطب رأسيا، وحتى إن هناك زاوية خاصة، زاوية بروستر، والتي لا ينعكس عندها أي ضوء مستقطب رأسيا على الإطلاق.

ضوء الشمس هو مزيج متساوٍ من الموجات المستقطبة رأسيا وأفقيا. وبما أن الموجات المستقطبة أفقيا تنعكس بشدة أكبر من الأسطح الأفقية، فإن النظارات الشمسية التي تمتص الضوء المستقطب أفقيا ستمنعك من رؤية معظم هذا الضوء المنعكس (شكل ١٢،١،١٤). ولهذا فإن النظارات الشمسية المستقطبة فعّالة في تقليل الوهج.

تحقق من فهمك # ٥: النظر في البركة العاكسة (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

عندما تنظر في بركة ماء، معظم ما تراه هو انعكاس السماء. لكن عندما ترتدي نظارات شمسية مستقطبة، فأنت ترى داخل الماء بوضوح. فسّر ذلك.



٢-١٤ مصابيح التفريغ

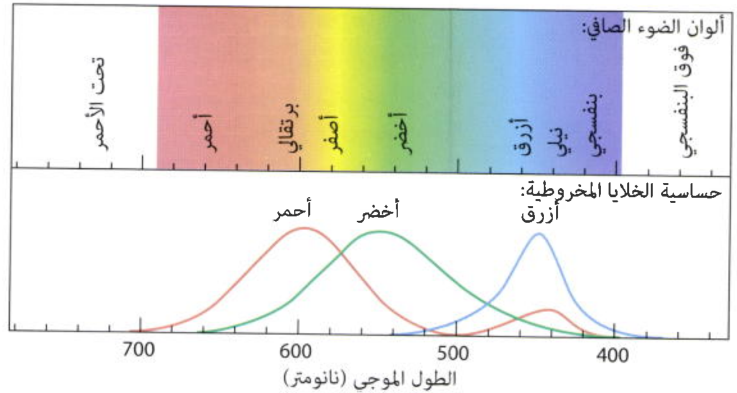
إن كفاءة الطاقة أمر بالغ الأهمية للإضاءة الحديثة. في حين توفّر المصابيح المتوهّجة إضاءة جميلة ودافئة، إلا أن معظم القدرة التي تستهلكها تُهدر كضوء تحت الأحمر غير مرئي. تُنتج المصابيح الفلورية ومصابيح التفريغ الأخرى ضوءا مرئيا أكثر بكثير بنفس مقدار القدرة الكهربائية وهي الآن سائدة في إضاءات المكاتب والمصانع والشوارع. في هذا القسم سوف نستكشف العديد من أنواع مصابيح التفريغ - المصابيح الفلورية، وبخار الزئبق، وبخار الصوديوم وهاليدات المعادن- والتي تتشارك جميعها في فكرة أساسية: تيار يمر خلال غاز.

أسئلة للتفكير

لماذا تكون للمصابيح الفلورية المختلفة غالبا ألوان مختلفة اختلافا طفيفا؟ لماذا يكون الضوء من لافتة نيون أحمر؟ هل ذرات النيون حمراء؟ لماذا تستغرق معظم المصابيح الفلورية بضع ثوانٍ لتُضيء؟ لماذا تكون إضاءة الشوارع خافتة جدا عند بداية تشغيلها؟ لماذا تكون أنوار بعض الطرق السريعة برتقالية اللون؟

تجارب يمكن القيام بها

افحص مصابيح التفريغ التي من حولك، خصوصا مصابيح الأنابيب الفلورية البيضاء. من أين تنشأ أضواؤها؟ في المصباح الفلوري، يأتي الضوء من الطلاء الفسفوري الأبيض الذي يُغطّي السطح الداخلي للأنبوب. ماذا عن مصباح النيون أو مصباح بخار الزئبق في إنارة الشوارع؟ قارن بين ألوان المصابيح المختلفة، بما في ذلك مصابيح فلورية متعددة. هل أضواؤها متطابقة؟
يضيء كلا المصباحين الفلوري والنيون مباشرة تقريبا. لكن انظر لطول الزمن الذي يستغرقه مصباح الشارع لكي يضيء. في حين تظل المصابيح الفلورية ومصابيح النيون باردة أثناء العمل، إلا أن مصابيح الزئبق والصوديوم وهاليدات المعادن المستخدمة في إضاءات الشوارع تصبح ساخنة. شاهد إضاءة شارع وهي تسخن. هل يتغير لونها؟ إذا فقدت إضاءة الشارع كهرباء حتى وإن كان للحظة، فإنها يجب أن تنتظر حوالي 5 دقائق قبل أن تستطيع التشغيل من جديد. لماذا يجب عليها الانتظار؟

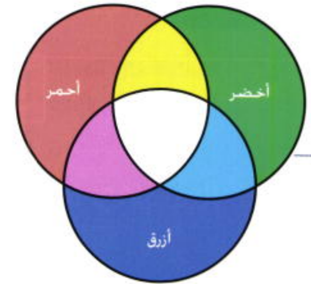


شكل ١,٢,١٤: الخلايا الحسّاسة للون الأحمر في شبكيتنا تستشعر الضوء القريب من 600nm، وتستشعر الخلايا الحسّاسة للون الأخضر الضوء القريب من 550nm، أما الخلايا الحسّاسة للون الأزرق فتستشعر الضوء القريب من 450nm. كما تستجيب الخلايا الحسّاسة للون الأحمر للضوء القريب من 440nm أيضاً، فنستطيع رؤية اللون البنفسجي.

كيف نرى الضوء والألوان

قبل فحص مصابيح التفريغ، دعنا ننظر في كيفية إدراك أعيننا للون. في حين قد يبدو أنها في الحقيقة تقيس الطول الموجي للضوء، إلا أن ذلك ليس صحيحا. بدلا من ذلك، تحتوي شبكية أعيننا على ثلاث مجموعات من الخلايا المخروطية الحسّاسة للضوء والتي تستجيب لثلاثة نطاقات مختلفة من الأطوال الموجية.

إحدى مجموعات الخلايا المخروطية تستجيب للضوء القريب من 600nm وتجعلنا نرى اللون الأحمر، ومجموعة أخرى تستجيب للضوء القريب من 550nm وتجعلنا نرى اللون الأخضر، ومجوعة ثالثة تستجيب للضوء القريب من 450nm وتجعلنا نرى اللون الأزرق (شكل ١,٢,١٤). هذه الخلايا المخروطية وفيرة عند مركز رؤيتنا. في حين تحتوي شبكياتنا أيضا على خلايا عصية، والتي هي أكثر حساسية للضوء من الخلايا المخروطية، إلا أن الخلايا العصية لا يمكنها تمييز الألوان. إن الخلايا العصية أكثر وفرة في رؤيتنا المحيطة وتوفّر لنا الرؤية الليلية.





شكل ٢,٢,١٤: (أ) يمكن دمج الألوان الأولية للضوء أو الألوان الجمعية، الأحمر والأخضر والأزرق، لتشكيل أي ألوان ضوئية. (ب) تطرح الألوان الأولية الصبغية أو الألوان الطرحية، السماوي والأرجواني والأصفر ألوان الأحمر والأخضر والأزرق على التوالي من الضوء المنعكس أوالنافذ ويمكن دمجها لتكوين أي لون صبغي.

إن امتلاك ثلاثة أنواع فقط من الخلايا الحسّاسة للألوان لا يحُدّنا لرؤية ثلاثة ألوان فقط. نحن ندرك ألواناً أخرى كلما أثير نوعان أو ثلاثة أنواع من الخلايا المخروطية في نفس الوقت. كل نوع من الخلايا ينقل للمخ كمية الضوء الذي يستشعره ويقوم مخنا بترجمة الاستجابة الكلية كلون معيّن.

في حين يستثير الضوء ذو الطول الموجي المعيّن جميع أنواع الخلايا المخروطية الثلاثة في وقت واحد، إلا أن الخلايا لا تستجيب بشكل متساوٍ. إذا كان الطول الموجي 680nm، فإن الخلايا المخروطية الحمراء ستستجيب بشدة أكبر من الخلايا الخضراء أو الزرقاء. بسبب هذه الاستجابة الحمراء الشديدة، نرى الضوء أحمر. تستثير الأطوال الموجية الأخرى الأنواع الثلاثة من الخلايا بشكل أكثر تساويا. الضوء ذو الطول الموجي 580 nm هو ضوء بين الأحمر والأخضر. تستجيب كلا الخلايا المخروطية الحسّاسة للأحمر والحسّاسة للأخضر بشكل متساوٍ لهذا الضوء ونحن نراه أصفر.

لكننا أيضاً نرى الأصفر عندما ننظر إلى مزيج متساوٍ من الضوء ذي 640nm (الأحمر) والضوء ذي 525nm (الأخضر). يستثير الضوء ذو 640nm الخلايا المخروطية الحسّاسة للأحمر ويثير الضوء ذو 525nm الخلايا الحسّاسة للأخضر. بالرغم من أنه لم يدخل لأعيننا ضوء ذو 580nm، إلا أننا نرى نفس اللون الأصفر كالسابق. في الحقيقة، مزج الضوء الأحمر والأخضر والأزرق يمكنه أن يجعلنا نرى أي لون. لهذا السبب، تُسمّى هذه الثلاثة ألوان بالألوان الأولية للضوء أو الألوان الجمعية الأولية (شكل ٢,٢,١٤ أ). يستخدم التلفاز الملوّن وشاشات الكمبيوتر مصادر صغيرة جدا للضوء الأحمر والأخضر والأزرق لإنتاج صورها الملوّنة كاملة.

في حين تنطبق فكرة مزج الألوان الأولية على الطلاء والحبر والأصباغ أيضا إلا أن لوحة الألوان مختلفة. الألوان الأولية الصبغية أو الألوان الأولية الطرحية هي السماوي والأرجواني والأصفر (شكل ٢,٢,١٤ ب). عندما تضع أحد هذه الأصباغ الأولية على سطح أبيض، فإنه يمتص أو يطرح أحد الألوان الأولية للضوء من انعكاس السطح. يطرح السماوي انعكاس الأحمر، ويطرح الأرجواني انعكاس الأخضر، ويطرح الأصفر انعكاس الأزرق. تستخدم الطابعات الملوّنة والصور الفوتوغرافية والمجلات والكتب بقعاً صغيرة جدا من أصباغ السماوي والأرجواني والأصفر لإنتاج صورها الملوّنة كاملة.

تحقق من فهمك #١: الضوء الممزوج

(للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

إذا نظرت إلى مزيج من 70 ٪ من الضوء الأحمر و30 ٪ من الضوء الأخضر، فما هو اللون الذي ستراه؟

ضوء أكثر، وحرارة أقل: التفريغ الغازي

عندما تستجيب جميع خلايانا الثلاثة الحسّاسة للون بشكل متساوٍ، فإننا نرى ضوءاً أبيض. ذلك لأن رؤيتنا تطورت تحت مصدر مصباح متوهج وحيد: الشمس. يستثير ضوء الشمس الخلايا الحسّاسة للأحمر والأخضر والأزرق في أعيننا بشكل متساوٍ تقريبا، لذا، فإن أي مصدر آخر «للضوء الأبيض» يجب أن يقوم بالمثل.

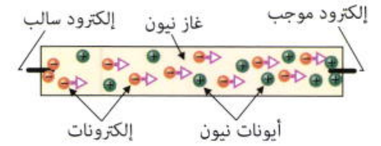
في حين يكون مصباح الضوء المتوهج محاولة جيّدة لإنتاج ضوء أبيض، إلا أنه يعاني من مشكلتين كبيرتين. أولاً، بما أن فتيلته لا تستطيع الوصول لدرجة حرارة سطح الشمس (5800°C)، فإن طيف الجسم الأسود له يحتوي على القليل من الضوء الأزرق ويظهر ضوؤه محمرا أكثر من ضوء الشمس. ثانياً، بما أن معظم طيفه الكهرومغنطيسي هو ضوء غير مرئي، فإنه لا يستخدم الطاقة بكفاءة لإنتاج ضوء مرئي.

من حسن الحظ، أعطانا العلم الحديث بعض مصادر الضوء البديلة، وهي مصادر لا تستخدم الحرارة والإشعاع الحراري لإنتاج ضوئها. من هذه المصادر مصابيح التفريغ الغازي، والتي تبعث ضوءاً عندما تمر تيارات كهربائية خلال غازاتها. ففي حين تكون بعض مصابيح التفريغ ملوّنة، إلا أن بعضها الآخر يقوم بإنتاج ضوء أبيض بشكل رائع. والعديد منها أكثر كفاءة من حيث الطاقة لإنتاج ضوء مرئي مقارنة بمصابيح الضوء المتوهجة.

لفهم تفريغات الغاز والضوء الذي تبعثه، لنبدأ بأحد الأمثلة البسيطة: أنبوب الإعلانات النيوني. على الرغم من أن الوهج الأحمر للنيون ليس مناسبا للإضاءة وليس كفؤاً من حيث الطاقة على وجه الخصوص، إلا أنه رائع للإعلانات و يسهل فهمه نسبيا أيضًا. أنبوب الإعلان النيوني هو أنبوب زجاجي مُحكم الإغلاق، يحتوي على غاز نيون صافٍ بكثافة أقل من 1 % من كثافة الجوّ خارج الأنبوب. للأنبوب إلكترودان (قطبان كهربائيان) معدنيان عند الأطراف بحيث يمكن للتيار الكهربائي أن يدخل للغاز خلال إلكترود واحد ويغادر خلال الآخر. من الطبيعي أن الغازات عازلة عادة، والنيون ليس استثناءًا. لتحويل نيون الأنبوب إلى موصّل، يتم وضع فرق فولطية كبير بين الإلكترودين. وكما رأينا في قسم ١٠-٢، يتفكك الغاز عند تعرضه إلى تدرج كبير في الفولطية؛ فتُنشئ أيونات الغاز القليلة الطبيعية الحدوث شلالا من التصادمات الأيونية والتي تملأ الغاز سريعاً بجسيمات مشحونة وتجعله موصلا.

في حين يتفكك الهواء المعتاد عند تدرج فولطي مقداره 30,000V/cm تقريبا، فإن النيون ذو الكثافة المنخفضة يتفكك عند تدرج فولطي أقل بكثير، وذلك لأنه في الغاز ذي الكثافة المنخفضة يمكن للجسيمات المشحونة أن تسير لمسافات أبعد وتكتسب طاقة حركية أكبر قبل كل تصادم. فعند وضع فولطية مقدارها 10,000V تقريباً بين الإلكرتودين في أنبوب إعلان نيوني، يتفكك الغاز ويبدأ ببعث وهجه الأحمر المألوف.

عندها يواجه المصباح تفريغاً؛ أي يتدفق تيار خلال غاز النيون. يتألف معظم هذا التيار من الإلكترونات، والتي تتدفق من



شكل ٣،٢،١٤: ترسل أنبوبة الإعلان النيون إلكترونات خلال غاز النيون ذي الضغط المنخفض. تصطدم هذه الإلكترونات مع ذرات النيون، فتنقل طاقة إليها وتتسبب في بعثها لضوء معظمه أحمر اللون. أيونات النيون المشحونة بشحنة موجبة، والتي تكوّنت بالتصادمات القوية جداً، تمنع الإلكترونات من التنافر مع بعضها البعض مع جدران الأنبوب.

إلكترود الأنبوب المشحون بشحنة سالبة إلى إلكترود الأنبوب المشحون بشحنة موجبة (شكل ٣،٢،١٤). في حين تتصادم هذه الإلكترونات بشكل متكرر مع ذرات النيون، إلا أن كتلتها الصغيرة تجعلها ترتد من على ذرات النيون دون أن تفقد الكثير من الطاقة. مثل ارتداد كرة تنس الطاولة من على فيل، فتقوم الإلكترونات بمعظم الارتداد ثم تستمر في طريقها.

لكن من وقت لآخر، سيصطدم إلكترون مع ذرة نيون وسيحدث شيء مختلف؛ ستعيد ذرة النيون ترتيب نفسها داخليا وستمتص جزءاً من طاقة الإلكترون الحركية. سيرتد الإلكترون بطاقة أقل من ذي قبل وستقوم ذرة النيون ببعث ضوء، ومن المحتمل لون أحمر. لكن لفهم لماذا يكون ذلك الضوء أحمر غالباً، سنحتاج أن ننظر للفيزياء الكمية وتركيب ذرة النيون.

تحقق من فهمك # ٢: صناعة ضوء أكثر بياضا (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

تُحاكي بعض مصابيح التصوير الفوتوغرافي ضوء الشمس بوضع مرشح أزرق أمام مصباح متوّهج. يمتص هذا المرشّح بعضا من الضوء الأحمر بحيث يبدو المصباح أكثر بياضا. هل يزيد أم يقلل هذا المرشّح من كفاءة طاقة المصباح؟

الذرات والضوء والفيزياء الكمية

وفقا لازدواجية الموجة-الجسيم والتي تعرضنا لها في قسم ١٢-١، فإن الإلكترونات لها الخاصيتان الجسيمية والموجية، وتُفهم إلكترونات الذرة بشكل أفضل على أنها موجات. ومثل جميع الأجسام في كوننا، تسير الإلكترونات كموجات عندما تنتقل من مكان لآخر، وتجدها كجسيمات فقط عندما تذهب للبحث عنها عند موضع معيّن (انظر ٢٥).

٢٥ في عام ١٩٢٧م، وضّح الفيزيائيان الأمريكيان كلنتون جوزف دايفيسون (١٨٨١ - ١٩٥٨م) وليستر هـ جرمير (١٨٩٦ - ١٩٧٢م) أن الإلكترونات تسير كموجات بملاحظة تأثيرات التداخل عندما تنعكس الإلكترونات من الطبقات الذرية المختلفة في بلورة معدن النيكل. فعندما وصلت الموجات الإلكترونية المتعددة للمستشعر في اتفاق طوري، وجد المستشعر العديد من الإلكترونات. وعندما وصلت الموجات مختلفة في الطور، وجد المستشعر القليل من الإلكترونات. ساند عملهم خطئًا سعيد الحظ عندما دخل الهواء أنبوب التجربة المفرغ من الهواء. فعندما أزالا الأكسجين بعناية من عينة النيكل بعد حدوث ذلك التسرّب، تمكنا من إتقان تركيبها الكرستالي، ليصبح من الممكن ملاحظة التداخل.

في الذرة، يوجد كل إلكترون في موجة موقوفة تُعرف بالمدار، بطاقة وتردد كمي محددتين. على الرغم من أن هذه المدارات موجات موقوفة ثلاثية الأبعاد، إلا أنها تشابه الموجات الموقوفة ذات البعدين لجلدة الطبل الموضحة في الشكل (٩،٢،٩). ومثل أنماط جلدة الطبل، تتميز المدارات عن بعضها البعض بأنماط عقدها – أي الأسطح التي لا يكون لموجة الإلكترونات عندها أي سعة.

مثل المستويات في الجسم الجامد، يمكن النظر للمدارات في الذرات كمواقع يمكن أن تكون مشغولة أو غير مشغولة بالإلكترونات. من هذا المنظور، تمتلئ مدارات الذرة بالإلكترونات من أقل مستوى طاقة إلى أعلاها. ووفقا لمبدأ باولي للاستبعاد، فإن كل مدار يُسكّن إلكترونين، أحدهما غزل للأعلى والآخر غزل للأسفل، إلى أن يُسكّن جميع إلكترونات الذرة. إن الطبيعة الكيميائية لذرة معيّنة، وموقعها في الجدول الدوري للعناصر (شكل ٤،٢،١٤) يحددها عدد الإلكترونات التي لديها وكيف تملأ هذه الإلكترونات المدارات المتوفّرة. إن الذرات متعادلة كهربائيا، فعدد الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة في الذرة هو نفسه عدد البروتونات المشحونة بشحنة موجبة في نواتها، وهو عددها الذري.

وكما أن هناك أنماطًا للمستويات - والتي تُنشئ النطاقات والفجوات النطاقية التي تميّز الجوامد المختلفة- كذلك هناك أنماطًا للمدارات- والتي تُنشئ القشرات وفجوات الطاقة التي تميّز الذرات المختلفة. إن القشرات هي مجموعات من المدارات التي لها طاقات متشابهة وتميل للامتلاء بالإلكترونات في نفس الوقت تقريبا. وعلى الرغم من أن أنماط المدارات وقشراتها معقدة نتيجة تأثير الإلكترونات المشحونة على بعضها البعض وتشويهها الموجات الموقوفة لبعضها البعض، إلا أن العديد من الخصائص الذرية تُحدد ببساطة بمعرفة أي من المدارات مشغول بإلكترونات الذرة.

ملء مدار 1s
عدد ذري
ملء مدار s
ملء مدارات p
ملء مدارات d
ملء مدارات f

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg							

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

فلزات قلوية – نشطة جداً، تميل للتبرع بإلكترونات s الوحيدة لإفراغ القشرة الخارجية

s فلزات قلوية ترابية – معتدلة النشاط، تميل للتبرع بإلكترونات

d فلزات انتقالية – فلزات شائعة لها خصائص متشابهة، تختلف فقط في عدد إلكترونات

فلزات ضعيفة – فلزات إضافية بخصائص مختلفة

أشباه الفلزات – متوسطة بين الفلزات واللافلزات

لافلزات – أشباه الموصلات والعوازل

واحد لإكمال القشرة الخارجية *p* هالوجينات – نشطة جداً، تميل لسرقة إلكترون

غازات نبيلة – غازات غير نشطة لها قشرات خارجية مكتملة

f لانثانيدات – فلزات متوسطة النشاط، تختلف فقط في عدد إلكترونات 4

f أكتينيدات – فلزات متوسطة النشاط، تختلف فقط في عدد إلكترونات 5

W-0246

شكل ٤,٢,١٤: يُنظِّم الجدول الدوري للعناصر بناء على ملء المدارات الإلكترونية. تمتلئ القشرات الرئيسية للمدارات بالإلكترونات من اليسار إلى اليمين. عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة يساوي عددها الذري.

تُعرَّف المدارات الذرية أساساً بعدد صحيح وحرف، كلاهما مرتبط بأنماط عقدها. العدد الصحيح (1، 2، 3، ...) هو عدد العُقد السطحية في المدار (0، 1، 2، ...) مضافا إليها واحد، بينما الحروف (s, p, d, f, g, h، ...) تشير إلى عدد العُقد السطحية التي تمر خلال مركز الذرة (0، 1، 2، 3، 4، 5، ...). وعلى الرغم من أن المدار s يبدو واحداً في الحالة الواحدة، إلا أن مدارات p تظهر في مجموعات ثلاثية، والمدارات d في مجموعات خماسية، ومدارات f في مجموعات سباعية، الخ.

ذرة النيون لها 10 إلكترونات، فتحتاج 5 مدارات لتسكينها. يقطن الإلكترونان الأولان في مدار 1s، النمط الأساسي الخالي من العُقد. تعبئة المدار 1s تُكمل القشرة الرئيسية الأولى. يذهب الإلكترونان التاليان إلى مدار 2s، والذي له عقدة سطحية واحدة لا تمر خلال مركز الذرة. أخيرا، تذهب إلكترونات النيون الستة المتبقية في مدارت 2p الثلاثة، والتي لكل منها عقدة سطحية واحدة تمر خلال مركز الذرة. بما أن ملء المدارات 2s و 2p يُكمل القشرة الرئيسية الثانية، فإن ذرة النيون (Ne في الشكل ١٤,٢,٤) خاملة كيميائيا. ولهذا يوجد النيون كغاز من ذرات فردية!

يسمّى الترتيب للمدارات المشغولة بالحالة والحالة التي وصفناها للتو هي الحالة الأرضية للنيون – الحالة التي لها أقل طاقة كلية ممكنة. لذرة النيون حالات أخرى متوفِّرة، لكنها جميعا تتطلب طاقة إضافية. هنا يدخل التفريغ في الصورة. فعندما

يصطدم جسيم مشحون بذرة نيون في الحالة الأرضية، هناك احتمال أن التصادم سينزع إلكتروناً إلى خارج مداره الاعتيادي وإلى أحد المدارات الفارغة. عندها ستكون ذرة النيون في حالة مثارة – أي سيكون لها طاقة إضافية.

افترض، على سبيل المثال، أن تصادماً أزاح أحد إلكترونات ذرة النيون من المدار 2p إلى المدار 3p. ستخضع الذرة سريعا لسلسلة من الانتقالات من حالة إلى حالة والتي في نهاية المطاف ستعيد الذرة لحالتها الأرضية. مع كل انتقال ستهبط الذرة إلى حالة ذات طاقة أقل وتطلق فوتوناً. يحمل الفوتون الطاقة المتحررة من الانتقال من الحالة ذات الطاقة الأعلى إلى الحالة ذات الطاقة الأقل. هناك احتمال قوّي أن أحد هذه الانتقالات سيزيح إلكتروناً من مدار 3p إلى مدار 3s ويُنتج فوتوناً من الضوء الأحمر، لون إعلان النيون الأحمر!

طالما ظلّ الإلكترون في المدار 3p – موجة موقوفة معيّنة – لا يمكنه أن يبعث موجة كهرومغنطيسية. تلك الموجة الموقوفة لها تذبذب كمّي ولكن التذبذب داخلي للإلكترون، فليس للإلكترون ولا لشحنته أي حركة إجمالية. إن الشحنة يجب أن تتسارع لكي تبعث موجات كهرومغنطيسية (انظر الفصل الثالث عشر)، وبدون حركة إجمالية لا يمكن أن يكون هناك انبعاث للموجات الكهرومغنطيسية.

لكن عندما يبدأ إلكترون 3p انتقاله إلى المدار3s الخالي، فإن موجته الكمية تبدأ بالتغيّر مع الزمن. تتحرك الموجة تناغميا ذهابا وإيابا أثناء الانتقال وتتسارع شحنتها معها. فتبدأ الذرة ببعث موجة كهرومغنطيسية. وفي الوقت الذي يكتمل فيه الانتقال، تكون الذرة قد بعثت جسيماً ضوئياً واحداً، أي فوتوناً من الضوء الأحمر. يسير الضوء كموجة لكنه يتصرف كجسيم مثل الإلكترون عندما تحاول تحديد موقعه، فبينما ينبعث الضوء أو يُمتص من قبل ذرة، فإنه يعرض طبيعته الجسيمية.

لقد رأينا أن الأجسام الساخنة تبعث ضوءا، في عملية تُسمّى التوهّج الحراري. لكن هنا تبعث ذرة النيون ضوءا بدون حرارة، في عملية تُسمّى استضاءة. تلك الاستضاءة هي نتيجة للانتقال المشع -أي انتقال بين الحالات يتم فيه انبعاث أو امتصاص فوتون من الضوء. في هذه الحالة، يبعث الانتقال المشع فوتونا يحمل معه الطاقة المتحررة عند نزوح إلكترون ذرة النيون في مدار 3p إلى المدار الفارغ 3s. الفرق في الطاقة بين هاتين الحالتين يُحدد طاقة الفوتون، والتي بدورها تُحدد تردد ولون الموجة الضوئية للفوتون.

بناء على الفيزياء الكمية، يتناسب تردد الفوتون مع طاقته. على وجه الخصوص، إن طاقة الفوتون تساوي تردد موجته الكهرومغنطيسية مضروبا في ثابت أساسي من ثوابت الطبيعة يُعرف بثابت بلانك. يمكن كتابة هذه العلاقة بين الطاقة والتردد كمعادلة لفظية:

الطاقة = ثابت بلانك × التردد (١،٢،١٤)

ورمزيا:

$$E= h \cdot v$$

وفي لغة الحياة اليومية: يمكن للضوء فوق البنفسجي وأشعة إكس أن تؤذي جلدك وأنسجتك لأن كل جسيم ضوئي ذي تردد عالٍ يحمل مقداراً كبيراً من الطاقة.

استُخدم ثابت بلانك لأول مرة من قِبل الفيزيائي الألماني ماكس بلانك (١٨٥٨ - ١٩٤٧م) في عام ١٩٠٠م لتفسير الطيف الضوئي لجسم ساخن، ولهذا الثابت قيمة مقدارها 6.626×10^{-34} J·s. وفي حين قد قابلنا للتو ثابت بلانك ومعادلة (١،٢،١٤) في سياق الموجات الضوئية، إلا أنه ينطبق حقيقة على جميع الموجات الكمية. على سبيل المثال، يرتبط التردد الكمّي للإلكترون بطاقته بواسطة المعادلة (١،٢،١٤).

إن ثابت بلانك صغير جدا لدرجة أنه حتى فوتون الضوء فوق البنفسجي ذي التردد 10^{15}Hz له طاقة مقدارها 6.626×10^{-19} J فقط. وهكذا، يحتوي شعاع ضوئي معتاد على العديد من الفوتونات التي لا يمكنك رؤيتها تصل كجسيمات. ولكن طاقة فوتون فوق بنفسجي واحد هائلة على المستوى الجزيئي، فيستطيع أن يتلف جزيئاً في جلدك، مساهما في حدوث حرق شمسي وحث جلدك للدبغ كاستجابة دفاعية. إن أشعة إكس لها ترددات أعلى، ويمكن لفوتوناتها ذات الطاقة العالية أن تتسبب في تلف جزيئي أشد ضررا.

يمكن لذرة النيون أن تبعث فقط فوتونات تقابل الفروق في الطاقة بين حالتين من حالاتها، وهذا قيد يحُد بشكل كبير طيفها الضوئي.

بإهمال قضايا نووية سنناقشها في الفصل السادس عشر، تكون جميع ذرات النيون متماثلة وتبعث نفس الطيف الضوئي المميّز. يسيطر على الجزء المرئي من ذلك الطيف الوهج الأحمر الدافئ للفوتونات المنبعثة عندما تنزاح الإلكترونات من المدارات 3p إلى 3s، ولهذا تتوهج إعلانات النيون باللون الأحمر.

بما أن ذرات العناصر المختلفة لها أعداد مختلفة من الإلكترونات وحالات مختلفة، فإن كلاً منها يبعث طيفاً ضوئياً خاصاً وفريداً بعد إثارتها. تبعث ذرات النحاس طيفاً أزرق مخضّراً، وذرات السترونشيوم تبعث طيفاً أحمر غامقاً، وذرات الصوديوم تبعث طيفاً أصفر - برتقالياً. يعتمد الكيميائيون والفلكيون والمصنعون على هذه الانبعاثات الطيفية في الحصول على معلومات وتنفيذ تطبيقات. وكما سنرى قريبا، يعتمد عليها العلماء والمهندسون الذين يعملون في مجال الإضاءة كذلك.

تحقق من فهمك #٣: الذرات الملوّنة

(للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

تتضمّن العديد من الألعاب النارية أضواءً ملوّنة رائعة. كيف تنتج الذرات في المواد الكيميائية المحترقة ضوءاً بألوان معيّنة؟

دقق في أرقامك #١: الجسيمات في موجة راديو

(للإجابة، انظر صفحة ٤٦٨)

ما مقدار الطاقة التي يحملها فوتون قادم من محطة إذاعة AM ذات تردد 1000kHz؟

المصابيح الفلورية

إذا كانت تعجبك أنابيب النيون في الإضاءة، فمن المحتمل أنك مختلف عن باقي الناس. إن معظم الناس يفضلون محاكاة أفضل بعض الشيء لضوء الشمس في مصابيح تفريغهم. وكمصدر صناعي لضوء الشمس ذي كفاءة في الطاقة فإنه من الصعب التغلب على المصابيح الفلورية.

يوجد في قلب المصباح الفلوري أنبوب زجاجي ضيّق مليء بغازات الأرجون والنيون و/أو الكريبتون عند حوالي 0.3 % من الكثافة والضغط الجوّي، كما يحتوي الأنبوب على بضع قطرات من سائل الزئبق المعدني، والذي يتبخر بعضها لتشكيل بخار الزئبق. إن تقريباً واحدة من كل ألف ذرة غاز داخل الأنبوب هي ذرة زئبق، وذرات الزئبق هذه هي المسؤولة عن الضوء الصادر.

مثل أنبوب الإعلان النيوني، يستخدم المصباح الفلوري تفريغا في غازه لإنتاج الضوء. ففي حين تستخدم المصابيح الفلورية في بعض الأحيان فولطيات عالية لبدء تفريغاتها، إلا أن معظمها يقوم بالتفريغ عند فولطيات منزلية ويجب أن تعتمد على تقنيات بديلة لجعل غازاتها موصّلة. هذه المصابيح ذات الفولطيات المنخفضة تُسخّن إلكتروداتها في العادة بحيث تُخرج الطاقة

الحرارية إلكترونات من أسطحها إلى الغاز، ولكن بغض النظر عن كيفية بدء التفريغ، النتيجة هي تيار يتدفق خلال الغاز وانبعاث ضوء.

لكن هناك مشكلة في المصباح الفلوري. في حين تبعث ذرات الزئبق معظم الضوء في تفريغها، فإن معظم ذلك الضوء تقريبا فوق بنفسجي. إن الانتقال الإشعاعي الأخير والذي يعيد كل ذرة زئبق لحالتها الأرضية ($6p \rightarrow 6s$) يحرّر كمية كبيرة من الطاقة ويُنتج فوتوناً بطول موجي 254nm. هذا الضوء لا يمكنه أن يمر خلال جدران الأنبوب الزجاجية، ولن يمكنك رؤيته إذا استطاع المرور. لذا، فإن المصباح الفلوري يحوّل هذا الضوء إلى ضوء مرئي بمساعدة مسحوق من مادة فسفورية داخل الأنبوب الزجاجي.

الفسفورات هي مواد جامدة تستضيء - أي تبعث ضوءا - عندما ينقل لها شيء ما طاقة، وسلوكها يُشابه سلوك الذرة: انتقال الطاقة يُزيح المادة الفسفورية من حالتها الأرضية إلى حالة مثارة وبعدها تخضع لسلسلة من الانتقالات والتي تعيدها لحالتها الأرضية، وبعض تلك الانتقالات إشعاعية وتبعث ضوءا.

في المصباح الفلوري، تُثار المادة الفسفورية بالضوء فوق البنفسجي. في الواقع هذه الإثارة أو انتقال الطاقة هي انتقال إشعاعي، ولكن يتم فيه امتصاص الفوتون من قِبل المادة الفسفورية؛ أحد إلكتروناتها يقوم بالانتقال من مستوى طاقة أقل إلى مستوى طاقة أعلى، وأثناء هذا الامتصاص، يدفع المجال الكهربائي للضوء موجة الإلكترون ذهابا وإيابا بشكل تناغمي إلى أن ينزاح للمستوى الجديد، فيختفي الفوتون وتستقبل المادة الفسفورية طاقته.

ما أن تصبح المادة الفسفورية في حالة مثارة، تبدأ إلكتروناتها بالانتقال عائدة إلى مستويات حالتها الأرضية. فتشع معظم هذه الانتقالات ضوءا مرئيا، وهو الضوء الذي تراه عند النظر في المصباح. ولكن بعض الانتقالات تشع ضوءاً تحت أحمر غير مرئي أو تتسبب في اهتزازات غير مفيدة في الفسفور ذاته. بالرغم من هذه الطاقة المهدرة، فإن للمادة الفسفورية كفاءة في تحويل الضوء فوق البنفسجي إلى ضوء مرئي، وهي عملية تُسمّى الفلورية.

يتم اختيار ومزج المواد الفسفورية في المصابيح الفلورية بعناية لكي تُضيء في مدى عريض من الأطوال الموجية المرئية. في حين ليس لهذا الضوء نفس طيف ضوء الشمس، إلا أنه يبدو أبيض لأنه يُثير الخلايا الحسّاسة للون الأحمر والأخضر والأزرق في أعيننا بشكل متساوٍ. مزج المواد الفسفورية ضروري لأنها مثل الذرات تضيء كل ذرة منها طيفا ضوئيا مميّزا والذي يُحدده الفروق في الطاقة بين مستوياته. يتطلب وجود العديد من المواد الفسفورية المختلفة لتكوين التوازن الصحيح بين الضوء الأحمر والأخضر والأزرق. ففي حين تستخدم بعض المصابيح الإعلانية وغير المألوفة مواداً فسفورية غير ممزوجة ذات ألوان ساطعة، إلا أن أنابيب الإنارة الفلورية تأتي بستة أنواع قياسية من مزج الألوان: الأبيض البارد (cool white)، والأبيض البارد الفاخر (deluxe cool white)، والأبيض الدافئ (warm white)، والأبيض الدافئ الفاخر (deluxe warm white)، والأبيض (white)، وضوء النهار (daylight).

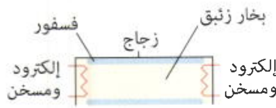
عندما تم تقديمها لأول مرة، كانت الأنابيب الفلورية تستخدم فسفور ضوء النهار. يبعث هذا الفسفور الكثير من الضوء الأزرق ويجعل كل شيء يبدو باردا وطبّيًا. لقد تطورت المواد الفسفورية عبر السنوات بحيث تبدو الفسفوران الأكثر شيوعا اليوم، وهما الأبيض البارد والأبيض الدافئ، مبهجين أكثر. يُشبه الضوء من الفسفورات «الباردة» ضوء النهار، بينما يُشبه الضوء من الفسفورات «الدافئة» الإنارة المتوهجة. في الغالب تستخدم الأنابيب الفلورية المنزلية الأبيض البارد الفاخر والأبيض الدافئ الفاخر، واللذين هما نسخة معدّلة أكثر بهجة للأبيض ولكن بكفاءة طاقة أقل قليلا.

تحقق من فهمك # ٤: نأسف، لقد نسينا الطلاء (للإجابة انظر صفحة ٤٦٧)

إذا لم يوجد طلاء فسفوري على السطح الداخلي لأنبوب فلوري، ما الذي ستراه عند تشغيل المصباح؟

بعض القضايا العملية

يحتاج الأنبوب الفلوري مجالاً كهربائياً كبيراً داخله لإبقاء إلكتروناته تسير إلى الأمام. وبما أن هذا المجال الكهربائي يتناسب مع الهبوط الفولطي خلال الأنبوب، فإن الأنابيب الأطول تحتاج فولطيات أعلى. إن فولطيات خطوط الكهرباء (110V إلى 240V) مناسبة للأنابيب التي يصل طولها إلى 3m (10ft)، ولكن تتطلب الأنابيب الفلورية الأكثر طولا والملوّنة غالبا التي تُستخدم في الفنون والإعلانات فولطيات أكبر بكثير.



شكل ٥،٢،١٤: في الأنبوب الفلوري ذي الإلكترود الساخن، تكون الإلكترودات في الواقع فتائل يتم تسخينها بإمرار تيارات خلالها.

لمنع الإلكترونات من دفع بعضها البعض نـحو الجدران، يجب أن يحتوي الأنبوب الفلوري على أيونات زئبق أيضاً مشحونة بشحنة موجبة. يُنتج التفريغ هذه الأيونات طبيعياً أثناء التصادمات ذات الطاقة العالية. النتيجة، وهي مزيج شبيه بالغاز من الأيونات المشحونة بشحنة موجبة والإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة، تُعرف بالبلازما. يتميز البلازما عن الغاز لأن جسيماته المشحونة تبذل قوى على بعضها البعض على مسافات كبيرة. تحتوي جميع مصابيح التفريغ المشغّلة على بلازما، بما في ذلك إعلانات النيون التي ناقشناها سابقا.

بما أن المصباح الفلوري الاعتيادي يجب أن يُسخّن إلكتروداته لتصل للون أحمر لكي يكوّن بلازمته، فإنه يمرر تياراً خلال الفتائل عند طرفي أنابيبه (شكل ٥،٢،١٤). وبمجرد أن يبدأ التفريغ، يمكن إيقاف تيار التسخين لأن الإلكترودات ستبقى ساخنة بالإلكترونات التي تصطدم بها من التفريغ. ولكن يمكن جعل الضوء خافتا باستخدام بعض التركيبات في الأنابيب الفلورية ، وفي هذه الحالة لن يُحافظ تسخين الإلكترونات وحده على بقاء البلازما، فيجب على التركيبات الخافتة للضوء في الأنابيب الفلورية أن تستمر في تمرير تيارات تسخين خلال فتائلها/إلكتروداتها.

من المؤسف أن الفتيلة/الإلكترود رقيق. يتلف الفتيلة/ الإلكترود بعملية تُسمّى الرش، حيث تصطدم أيونات الزئبق الموجبة الموجودة في البلازما بالفتيلة/الإلكترود فتنزع ذرات التنجستن منها. وبما أن الرش شديد أثناء بدء التشغيل على وجه الخصوص، فإنه من المعتاد أن ينكسر الفتيلة/الإلكترود بعد بضعة آلاف تشغيل. ولهذا يجب أن لا تفتح وتغلق المصباح الفلوري أكثر من مرة كل بضع دقائق.

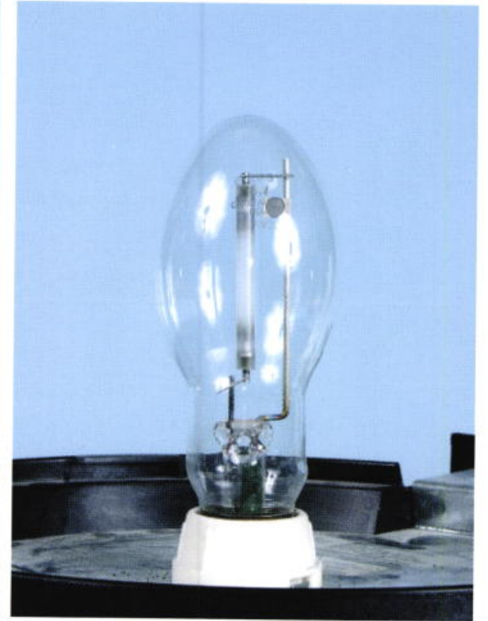
تحقق من فهمك # ٥: البدء الأحمر

(للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

لماذا تتوهج أطراف بعض المصابيح الفلورية بلون أحمر أثناء بدء التشغيل؟

الزئبق، والهاليدات المعدنية، ومصابيح الصوديوم

في حين يبعث تفريغ الزئبق ذو الضغط المنخفض ضوءاً فوق بنفسجي في الغالب، إلا أن تفريغ الزئبق ذا الضغط العالي يبعث ضوءاً مرئياً أكثر من الضوء فوق البنفسجي. إن هذا التغيّر يحدث لأن الضوء فوق البنفسجي يُصبح محبوسا في ذرات الزئبق المجمّعة بكثافة والضوء المرئي فقط قادر على الهروب من التفريغ. تُعرف هذه الظاهرة بالانحباس الإشعاعي، وتحدث لأن ذرات الزئبق تمتص الفوتونات ذات الطول الموجي 254nm بنفس المقدرة على بعثها. نفس الانتقال الإشعاعي الذي يتسبب في بعث ذرة الزئبق لفوتون 254nm ($6p \rightarrow 6s$) يمكنه أيضا أن يعمل بشكل عكسي لامتصاص ذلك الفوتون ($6s \rightarrow 6p$). ففي غاز زئبق كثيف، كلما بعثت ذرة زئبق واحدة فوتوناً ذا 254nm، فإن ذرة زئبق أخرى تمتص ذلك الفوتون. ففي حين يحافظ التفريغ على تدفق الطاقة إلى ذرات الزئبق، فإنها لا تستطيع التخلص منها على هيئة فوتونات ذات 254nm. بدلا من ذلك، تبعث الذرات معظم طاقتها خلال انتقالات إشعاعية بين حالات مثارة أخرى. وبما أن احتمالية أسر هذا الضوء الإضافي من قِبل ذرات زئبق أخرى قليلة فإنه يخرج من المصباح كضوء مرئي مزرق.




شكل ٦،٢،١٤: العنصر النشط في مصباح بخار الصوديوم ذي الضغط المرتفع هو أنبوب صغير نصف شفاف. بينما يسخن المصباح، يتبخر معدن الصوديوم في الأنبوب لكي يكوّن تفريغاً أصفر رائعاً. يحبس البخار الكثيف من ذرات الصوديوم في الأنبوب الضوء ذا الطول الموجي 590nm بحيث يبعث المصباح طيفاً أكثر غزارة من الأطوال الموجية ووهجاً أقل أحادية في الأطوال الموجية مقارنة بمصباح الصوديوم ذي الضغط المنخفض.

بإذن لو بلومفيلد

عندما تبدأ بتشغيل مصباح زئبق ذي ضغط عالٍ، يكون معظم الزئبق سائلاً والضغط منخفضاً، فيبدأ المصباح وكأنه أنبوب فلوري صغير بدون مادة فسفورية، فترى القليل من الضوء المرئي ولكن الأنبوب مصمَم على أن يسخن أثناء التشغيل بحيث يتبخر الزئبق السائل لتكوين غاز كثيف. وبينما يرتفع ضغط الغاز، يتغير لون الأنبوب إلى أن يبعث ضوءاً أبيض - مزرقاً ساطعا.

لصناعة مصباح أقل زرقة، تحتوي بعض مصابيح الزئبق ذات الضغط المرتفع على ذرات معادن إضافية، حيث يتم إدخال هذه الذرات إلى المصابيح على هيئة مركبات يوديد - معدن، جاعلة منها مصابيح هاليدات - معدن. يوديدات الصوديوم والثاليوم والانديوم والسكانديوم جميعها تساهم بطيفها الانبعاثي الخاص في الضوء الخارج وتساعد في تقوية الجانب الأحمر من طيفه، فهي تُعطي مصابيح هاليدات - معدن ألواناً أدفأ من مصابيح الزئبق الصافي.

تُشابه مصابيح الصوديوم الصافي مصابيح الزئبق، إلا أنها تستخدم ذرات صوديوم. إن الصوديوم جامد في درجة حرارة الغرفة، لذا فإن كلا مصابيح الصوديوم ذات الضغط المنخفض والمرتفع يجب أن تسخن قبل أن تبدأ بالعمل بشكل جيّد. إن مصباح الصوديوم ذا الضغط المنخفض ذو كفاءة عالية في الطاقة لأن ضوءه ذا الطول الموجي 590nm يأتي مباشرة من انتقال ذرة الصوديوم الإشعاعي الأكثر شدة. ذلك الانتقال هو من أقل حالة إثارة للصوديوم إلى حالته الأرضية (3p → 3s). الكثير من الطرق السريعة يتم إنارتها بالوهج الأصفر - البرتقالي لمصابيح الصوديوم ذي الضغط المنخفض.
لكن هذه الإضاءة الأحادية الضوء غير جميلة ولا تسمح برؤية الألوان إطلاقا، ففي حين قد تكون مقبولةً في الطرق السريعة، إلا أنك لن تريدها بالقرب من منزلك. ولهذا يقتني الناس مصابيح صوديوم ذي ضغط مرتفع للاستخدام المنزلي (شكل ٦،٢،١٤).

من المدهش أن انبعاث الضوء ذي 590nm ذاته يمتد عند الضغط المرتفع ليُغطّي مدى واسعاً من الأطوال الموجية، من الأصفر المخضر إلى البرتقالي المحمر. يحدث هذا التمدد بسبب التصادمات الكثيرة التي تعانيها ذرات الصوديوم المجمّعة بكثافة حينما تحاول أن تبعث الضوء ذا 590nm. إن هذه التصادمات تشوّه المدارات الذرية بحيث تخرج الفوتونات بطاقات مزاحة نوعاً ما. إجمالا، يبعث مصباح الصوديوم ذي الضغط المرتفع ضوءا قليلا جداً عند 590nm بالضبط لأن ذرات الصوديوم التي في الحالة الأرضية تحبس ذلك الضوء؛ تقوم بالانتقال (3p → 3s) بشكل عكسي وتمتص الفوتونات

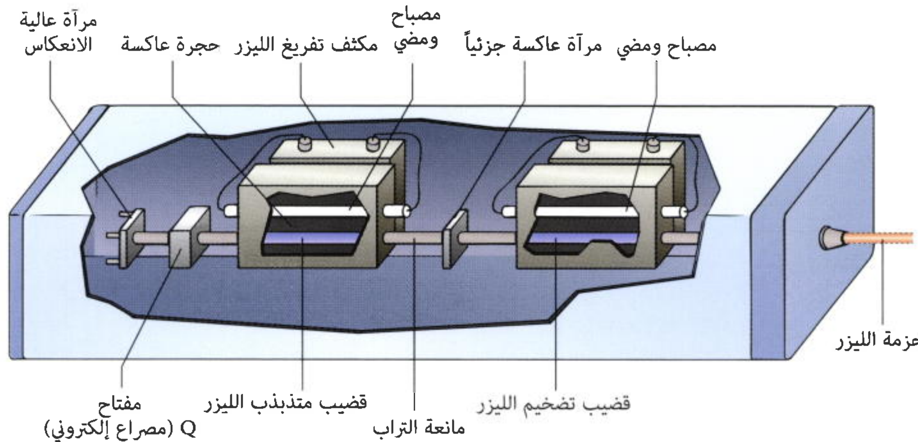
(3s →3p). إن هذا الانـحباس فعّال جدا بحيث يكون هناك فراغ في الواقع في طيف المصباح عند 590nm تماما.

تعاني مصابيح التفريغ ذات الضغط المرتفع من مشكلة ليست موجودة في مصابيح الضغط المنخفض: من الصعب تشغيلها عندما تكون ساخنة. إن بدء التفريغ في غاز ذي ضغط مرتفع أصعب منه في غاز ذي ضغط منخفض، لذا، فإن جميعها يبدأ بضغط منخفض ثم يتطوّر لضغط مرتفع. إذا تم إعاقة التفريغ في مصباح زئبق أو بخار الصوديوم أو هاليد – معدن ذي ضغط مرتفع ففقد بلازمته، فإن على المصباح أن يبرد قبل أن يمكن إعادة تشغيله.

تحقق من فهمك # ٦: التوهّج البطيء

(للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

عند الغروب، يبدأ عمل مصباح إنارة الشوارع الزئبقي. في البداية يتوهّج بشكل خافت ويزيد سطوعه تدريجياً. ما الذي يحدث أثناء فترة التسخين هذه؟



١٤-٣ الليزرات والدايودات الباعثة للضوء LED

لا توجد إلا القليل من الأجهزة التي أثارت خيالنا أكثر من الليزرات. منذ اختراعها في أواخر الخمسينيات، وجدت الليزرات عدداً لا يُحصى من الاستخدامات، من قطع المعدن وفتح شرايين البشر إلى مسح الأرض وتشغيل الأقراص المدمجة *(CD)*. لكن الليزرات ليست فقط تطبيقات مبتكرة لأفكار قديمة، فبدلا من ذلك، تقوم بجمع الفيزياء الكمية والبصرية لإنتاج نوع جديد من الضوء. هذا الضوء مختلف جوهريا عن الضوء الناتج من المصابيح المتوهجة أو الفلورية، وخصائصه تجعله مفيداً جداً في العديد من التطبيقات. في هذا القسم سوف نفحص طبيعة هذا الضوء الجديد والطرق التي تنتجه بها الليزرات.

أسئلة للتفكير:

لماذا يكون ضوء الليزر عادة ملوّناً وساطعاً؟ لماذا يبدو الليزر في الغالب كشعاع ضيق؟ في الأفلام، كثيراً ما تظهر «الليزرات» على أنها تبعث خطوطاً ساطعة من الضوء والتي يمكن تجنبها إذا قفز شخص بسرعة كافية؛ هل هذا المشهد واقعي؟

تجارب يمكن القيام بها:

مع أن الليزرات من الأجهزة المنزلية، إلا أن الليزرات التي في مشغلات الأقراص المدمجة *(CD)* أوأقراص الفيديو الرقمية *(DVD)* وطابعات الليزر لا يمكن الوصول إليها نسبيا. فإذا لم تمتلك مؤشر ليزر، فانظر في ماسح الشفرة الخيطية *(barcode)* في المتجر. يحتوي نظام المسح على ليزر غازي أو صلب يبعث شعاعاً ضيّقاً جدا من ضوء أحمر ساطع، كما يحتوي هذا النظام على مرآة أو قرص تصوير تجسيمي هولوغرافي يدور، فيقوم بتوجيه الشعاع على هيئة أشرطة رفيعة على أي شيء يمر خلال الماسح. يراقب مستشعر ضوء داخل النافذة سير هذا الشعاع الضوئي المتحرك عبر الملصق. إذا نظرت للأسفل إلى ضوء الليزر الخارج من نافذة الماسح أو شاهدت بقعة مؤشر الليزر على الجدار، فإنك سترى كلاً من نقاوة لونه وخاصيته المنقّطة الغريبة؛ فيبدو الضوء وكأنه يحتوي على نقط صغيرة جدا مضيئة ومظلمة. تحدث هذه النقط بسبب تأثيرات التداخل، والتي تظهر جليا في ضوء الليزر المرتّب. يظهر هذا الضوء أيضا ساطعا بشكل غير معتاد، ومثل وقت النظر في الشمس، يجب أن تُبقي نظرتك له قصيرة لتفادي الإصابة في العين.

تحذير

ضوء الليزر خطر. بما أن ضوء الليزر يمكن أن يكون ساطعا بشكل كبير ويمكنه أن يتركّز بإحكام، فإنه يشكّل مصدر خطر عظيم للعين. إن شعاع الليزر الذي يدخل عينك سيتركّز في بقعة صغيرة جدا على شبكيتك وقد يتسبب في إصابة سريعة ودائمة. ففي حين أن الليزرات إلى الصنف III آمنة للعين نسبيا، إلا أنها تعتمد على ارتداد طرفك الطبيعي لحمايتك. يجب أن لا تحدّق النظر في أي ليزر. الليزرات ذات الصنف IV ليست آمنة للعين ويجب أن لا يدخل ضوؤها عينك إطلاقا.

الليزرات وضوء الليزر

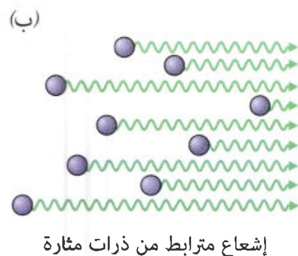
لفهم الليزرات، يجب عليك أن تفهم كيف يختلف ضوء الليزر عن الضوء المعتاد المنبعث من الأجسام الساخنة أو من الذرات المنفردة في تفريغ كهربائي. كل جسيم من الضوء الاعتيادي، أي كل فوتون، ينبعث تلقائيا دون أي علاقة تربطه مع جسيمات الضوء الأخرى المنبعثة بالجوار. وبسبب خاصية هذا الضوء المستقلة والتي لا يمكن التنبؤ بها، فإنه يُسمّى ضوءاً تلقائياً ويسمّى تكوينه الانبعاث التلقائي للإشعاع.

(أ)



إشعاع غير مترابط من ذرات مثارة

(ب)



إشعاع مترابط من ذرات مثارة

الشكل ١,٣,١٤: (أ) تنشأ فوتونات الضوء غير المترابط بشكل مستقل ولها أطوال موجية واتجاهات سير مختلفة بعض الشيء. (ب) تنتج فوتونات الضوء المترابط من الانبعاث المستحث وهي متماثلة لبعضها البعض من كافة الجوانب.

لكن البحث النظري الذي قام به ألبرت أينشتاين وآخرون في العشرينيات والثلاثينيات الميلادية تنبأ بوجود نوع آخر من الضوء، الضوء المستحثّ، والذي يمكن تكوينه عندما تقوم ذرة مثارة أو نظام شبيه بالذرة بعمل نسخة طبق الأصل من فوتون مار. ففي حين يمكن أن يحدث هذا الانبعاث المستحث للإشعاع فقط عندما تكون الذرة المثارة قادرة على بعث الفوتون المطابق بشكل تلقائي، إلا أن النسخة التي تنتجها مطابقة تماما إلى درجة أن الفوتونين لا يمكن التمييز بينهما إطلاقا. يُشكّل هذان الفوتونان سويةً موجة كهرومغنطيسية واحدة.

للحصول على صورة أفضل لكيفية حدوث مثل هذا الحثّ، فكّر في ذرة معزولة في حالة مثارة. ستعود تلك الذرة بعد حين لحالتها الأرضية، لكن يجب أن تبعث فوتونا واحدا أو أكثر لكي تحدث هذه العودة. تنتظر تلك الذرة في الحالة المثارة إلى أن تبدأ انتقالاً إشعاعياً تلقائياً. أثناء الانتقال، يتسارع أحد إلكترونات الذرة ذهابا وإيابا وتبعث الذرة فوتوناً.

لكن إذا مرّ فوتون مماثل خلال الذرة أثناء انتظارها في الحالة المثارة، فإن المجال الكهربائي لذلك الفوتون يمكنه أن يحُثّ عملية الانتقال الإشعاعي من خلال الاهتزاز المتجانس، فيدفع ويسحب المجال على إلكترونات الذرة فيجعلها تتسارع ذهابا وإيابا. ففي حين أن هذا التأثير صغير، إلا أنه قد يكون كافيا لإحداث انبعاث ضوئي، فإذا بعثت الذرة ضوءا، فإن الفوتون الذي تنتجه سيكون نسخة طبق الأصل من الفوتون المستحث. عندما تم اكتشاف عملية الانبعاث المستحث أول مرة، أدرك الناس فورا أن هذه العملية جعلت من الممكن تضخيم الضوء. فإذا أمكن تجميع أنظمة مثارة كافية سوية، فإن فوتوناً واحداً ماراً يمكنه أن يُنسخ تماماً مرة بعد أخرى، وبدلا من جسيم ضوئي واحد، ستحصل عاجلا على آلاف أو ملايين أو حتى ترلايين من جسيمات الضوء المطابقة.

لكن كان على تطبيق هذه الفكرة الانتظار إلى أواخر الخمسينيات الميلادية لحين إتمام معرفة التفاصيل التقنية لكيفية تحقيق تضخيم الضوء فعليا. في عام ١٩٦٠م، تم بناء أول متذبذبات ليزرية، وكانت أجهزة تبعث أشعة ضوء ذات شدة عالية، حيث كان كل جسيم ضوئي مطابقا لكل جسيم ضوئي آخر. كان قد تم فيها نسخ جسيم ضوئي واحد إلى نسخ لا تُحصى من خلال عملية الاستحثاث.

عندما تبعث الذرات المثارة المفردة أو الأنظمة الشبيهة بالذرة ضوءا من خلال الانبعاث التلقائي، فإن



شكل ٢,٣,١٤: يستخدم مضخِّم الليزر ذرات أو أنظمة شبيهة بالذرة في حالة إثارة لزيادة عدد جسيمات الضوء المغادرة للوسط الليزري. يتم نسخ الضوء الداخل عن طريق الانبعاث المستحث.

الجسيمات الضوئية تنتشر كموجات كهرومغنطيسية عديدة مستقلة (شكل ١,٣,١٤ أ). إن الضوء الذي يحتوي على العديد من الموجات الكهرومغنطيسية المستقلة يُسمّى ضوءاً غير مترابط.

لكن عندما تبعث تلك المجموعة نفسها من الذرات أو الأنظمة الشبيهة بالذرة ضوءا عن طريق الانبعاث المستحث، فإن جميع جسيمات الضوء متطابقة تماما وتشكّل موجة كهرومغنطيسية وحيدة (شكل ١,٣,١٤ ب). يُسمّى الضوء الذي يحتوي على العديد من الفوتونات المتطابقة وموجة كهرومغنطيسية وحيدة ضوءا مترابطا. وبسبب طبيعته ذات الموجة الوحيدة، يُظهر الضوء المترابط تأثيرات تداخل رائعة، ويمكن رؤية هذه التأثيرات بسهولة في الضوء المترابط المنبعث من الليزرات.

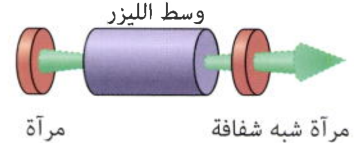
تحقق من فهمك # ١: نفض الفوتونات (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

إذا كنت ستقيس المجال الكهربائي في ضوء كشّاف ضوئي، ستجد أنه يتذبذب عشوائيا. لماذا يكون المجال الكهربائي للضوء مضطرب؟

مضخمات الضوء والتذبذبات

إن إنتاج ضوء مترابط يتطلب تضخيماً. يجب أن تبدأ بجسيم ضوئي واحد فقط وتنسخه عدة مرّات. إن الأداة الأساسية لنسخ الضوء هو المضخّم الليزري (شكل ٢,٣,١٤). عندما يدخل ضوء ضعيف على مجموعة مناسبة من الذرات أو الأنظمة الشبيهة بالذرات المثارة - أي الوسط الليزري - فإن ذلك الضوء يُضخّم ويُصبح أكثر سطوعا. إن الضوء الجديد له نفس خصائص الضوء الأصلي تماما، لكنه يحتوي على فوتونات أكثر.

عندما نفكّر في الليزرات، فإننا نادرا ما نتخيّل جهازاً ينسخ الفوتونات من مكان آخر. في الغالب نتصوّر جهازاً يكوّن ضوءا من ذاته بالكامل. للقيام بذلك، يجب على الليزر أن يُنتج الجسيم الضوئي الابتدائي الذي ينسخه بعد ذلك لإنتاج جسيمات ضوئية أخرى. المتذبذب الليزري هو جهاز يستخدم الوسط الليزري ذاته لتوفير الفوتون البذري، والذي ينسخه بعدها عدة مرّات (شكل ٣,٣,١٤). فإذا حُصر الوسط الليزري بزوج من المرايا المصممة بعناية، فإنه من الممكن أن تصبح عملية الحثّ ذاتية البدء وذاتية الاستمرار. ولكن يجب أن تكون المرآتان مقوّسة بشكل صحيح ويجب أن يكون لها معاملات انعكاس صحيحة، حيث يجب أن تكون إحدى المرآتين عالية الانعكاسية، بينما الأخرى يجب أن تُنفذ جزءاً صغيراً من الضوء الذي يسقط على سطحها.



شكل ٣,٣,١٤: المتذبذب الليزري هو مضخّم ليزر محصور بمرايا. يحدث التذبذب عندما يبعث الوسط الليزري فوتونا واحدا بشكل تلقائي في الاتجاه الصحيح تماماً. هذا الفوتون يرتد ذهابا وإيابا بين المرآتين ويُنسخ عدة مرّات. يُستخلص بعض هذا الضوء من هذا الليزر بجعل إحدى المرآتين شبه شفافة.

عند وضع الوسط الليزري بين المرآتين، فإن هناك احتمالاً أن فوتونا منبعثاً تلقائيا من أحد الأنظمة المثارة سيرتد من على المرآة ويعود نحو الوسط الليزري. وبينما يمر هذا الفوتون العائد خلال الوسط الليزري، فإنه يتضخّم. ولأن الفوتون انبعث من قِبل أحد الأنظمة المثارة، فإن له الطول الموجي الصحيح لكي يتضخّم من قِبل أنظمة مثارة أخرى. (لنقاش حول خصائص الفوتون،انظر ٥[٤]).

بحلول وقت مغادرة الفوتون الأصلي للوسط الليزري، يكون قد تم نسخه عدة مرّات. ومن ثم ترتد هذه المجموعة من الفوتونات المتطابقة من على المرآة الثانية وتعود لتمر مرة أخرى خلال الوسط الليزري. يستمر الفوتون بالارتداد ذهابا وإيابا بين المرآتين إلى أن يصبح عدد الفوتونات المتطابقة في المجموعة عدداً هائلا. في نهاية الأمر يكون هناك الكثير من الفوتونات المتطابقة بحيث لا يعود الوسط الليزري قادرا على تضخيمها. فالوسط الليزري محدود بمقدار الطاقة المخزونة داخله وبعدد الأنظمة المثارة داخله. فإذا استمر الوسط الليزري باستقبال طاقة إضافية، فقد يستمر في تضخيم الضوء بعض الشيء، ولكن إذا لم يستقبل مزيدا من الطاقة، فسيتوقف تضخيم الضوء في نهاية المطاف.

للسماح للضوء بالخروج من هذا المتذبذب الليزري، فإن إحدى مرآتيه في العادة تكون شبه شفّافة - أي أن بعض الفوتونات التي تسقط على سطح المرآة تسير خلالها بدلا من أن تنعكس، وتكوّن هذه النافذية شعاعا من الضوء الخارج، أي شعاع ليزر. يستمر شعاع الليزر بالخروج من المرآة طالما استطاعت عملية التضخيم أن تدعمه. ولأن أن شعاع الليزر يحتوي على نسخ من فوتون أصلي واحد، فإنه ضوء مترابط. وتقوم العديد من الليزرات بنسخ أكثر من فوتون أصلي في نفس الوقت لأسباب تقنية، بحيث تكون أشعتها الليزرية أقل ترابطا مما يمكن أن تكون. لكن بالضبط الدقيق والمناسب، يمكن جعل أحد الفوتونات الأصلية يهيمن على شعاع الليزر.

عندما تركّز شعاع كشّاف ضوئي باستخدام عدسة، فإن فوتوناته المستقلة لن ينتهي بها المطاف سوية عند بؤرة العدسة تماما، وذلك لأن الفوتونات تُغادر الكشّاف الضوئي متجهة في اتجاهات مختلفة بعض الشيء ولأن مداها الواسع من الأطوال الموجية يؤدي إلى مشاكل تشتت في العدسة، ولكن بما أن جميع الفوتونات تقريباً في شعاع الليزر متطابقة، فإنه يمكنها أن تتركّز سوية في بقعة صغيرة جدا. ولهذا تستخدم طابعات الليزر ليزراً؛ ويمكن لليزر أن يضيء بقعة صغيرة جدا على أسطوانة الموصل الضوئي والتي تُستخدم في عملية النسخ الزيروغرافي لإنتاج صورة مطبوعة.

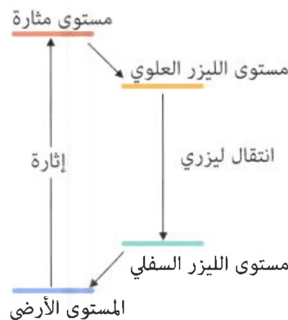
٥ ٤ في حين أنه قد يبدو أن الفوتون يجب أن يكون له طول موجي وتردد محدد بدقة، وأن يسير في اتجاه واحد فقط، إلا أن هذا ليس هو الوضع الحقيقي. تسير الفوتونات كموجات كهرومغنطيسية وتنتشر في أكثر من اتجاه واحد. وبسبب أن لكل فوتون بداية ونهاية، فإن موجته تحتوي على أكثر من طول موجي واحد أو تردد واحد. وهكذا، في حين يمكن لليزر أن يُنتج بعضا من أكثر الموجات الكهرومغنطيسية مثالية والتي يمكن تخيّلها، إلا أن تلك الموجات ما زالت تنتشر خارجيا بعض الشيء وما زال لها مدى من الأطوال الموجية والترددات.

تحقق من فهمك # ٢: المزيد من شيء طيّب (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

إذا أخذت شعاعا ليزريا من متذبذب ليزري معيّن وأرسلته خلال مضخّم ليزري مشابه، ماذا سيحدث لشعاع الليزر؟

كيفية عمل الوسط الليزري

يُعدّ الحصول على الأنظمة المثارة المطلوبة لتضخيم الضوء قضية أساسية في الليزر، ففي الحالة المثالية، يشتمل الليزر على أربعة مستويات مختلفة للذرة أو النظام الشبيه بالذرة: المستوى الأرضي، ومستوى إثارة، ومستوى الليزر العلوي، ومستوى الليزر السفلي. إن سبب الاحتياج لأربعة مستويات منفصلة سيصبح واضحا بعد قليل. دعنا نتأمل ذرة تعمل كمضخّم ليزري مثالي (شكل ٤,٣,١٤). تبدأ الذرة في مستواها الأرضي، ثم يزيحها تصادم أو امتصاص فوتون إلى مستوى إثارة، معطيا إياها الطاقة التي تحتاج إليها لتكبير الضوء. عندها تنزاح الذرة إلى مستوى الليزر العلوي، إما ببعث فوتون أو نتيجة تصادم. هذه الإزاحة الأولية مهمة لأنها تمنع الذرة المثارة من العودة مباشرة إلى المستوى الأرضي وتجنّب عملية التضخيم. فبمجرد أن تنزاح الذرة إلى مستوى الليزر العلوي، تنحبس الذرة هناك وستنتظر هناك بما يكفي لتضخيم الضوء.

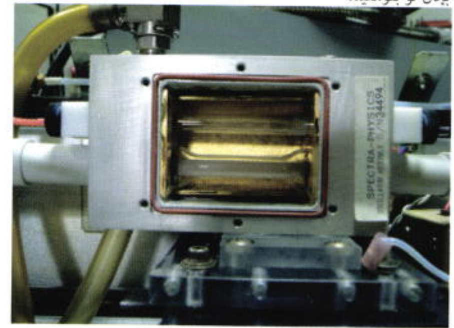


شكل ٤,٣,١٤: يمر نظام الليزر المثالي خلال أربع حالات أثناء عمل الليزر.

عند مرور فوتون مناسب خلال الذرة، فإن ذلك الفوتون يحث على انبعاث فوتون مطابق وتخضع الذرة لانتقال إشعاعي إلى مستوى الليزر السفلي. إلى الآن كل شيء جيّد. ولكن إذا ظلت الذرة في مستوى الليزر السفلي، فإنها قد تمتص فوتونا من ضوء الليزر وتعود لمستوى الليزر العلوي. لمنع مثل هذا الانحباس الإشعاعي، فإنه يجب على الذرة أن تنزاح سريعا إلى المستوى الأرضي، إما ببعث فوتون أو نتيجة لتصادم آخر. عندها تصبح الذرة مستعدة لتبدأ الدورة من جديد.

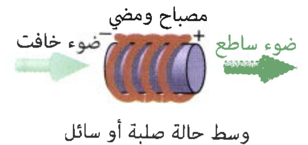
هذه الدورة ذات الأربعة مستويات، أو شيء قريب منها، موجودة تقريبا في جميع الليزرات. تساعد هذه الدورة الليزر على تكوين انقلاب تعدادي بين مستويي الليزر العلوي والسفلي - وهو وضع يكون فيه ذرات مستوى الليزر العلوي المستعدة لبعث ضوء الليزر أكثر من ذرات مستوى الليزر السفلي المستعدة لامتصاص ذلك الضوء. إن الحصول على انقلاب تعدادي مهم جدا في تضخيم الليزر لأنه بدونه يكون الوسط الليزري ماصاأكثر من مضخم ولا يمكن أن يكون هناك زيادة في شدة الضوء.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٦،٣،١٤: يحتوي هذا المضخم الليزري المُضخ بمصباح ومضي على قضيب نيوديميوم - ياغ بنفسجي اللون. يوجد القضيب في النصف الأسفل من صندوق المضخّم المكسو بالذهب وهو محمي بأنبوب زجاجي. يثير الضوء الصادر من مصباح ومضي طويل في النصف الأعلى للصندوق أيونات النيوديميوم بحيث يمكنها تضخيم الضوء تحت الأحمر المار أفقيا خلال القضيب.

في كل ليزر، يوجد شيء يوفر الطاقة اللازمة لإزاحة الذرات أو الأنظمة الشبيهة بالذرات في الوسط الليزري من مستوياتها الأرضية إلى مستويات إثارتها لكي تكوّن انقلاباً تعدادياً. يُسمّى هذا الانتقال في الطاقة إلى الوسط الليزري والذي يجعله مستعدا لتضخيم الضوء بالضخ، وتعتمد كيفية ضخ وسط ليزري معيّن على الليزر نفسه.



شكل ٥،٣،١٤: في الليزر المُضخ ضوئيا، يقوم ضوء ذو شدة عالية صادر من مصباح ومضي أو مصباح قوسي أو حتى ليزر آخر بنقل الطاقة إلى الوسط الليزري. تُخزّن الذرات أو الأنظمة الشبيهة بالذرة داخل الوسط هذه الطاقة وتستخدمها لتضخيم الضوء.

أكثر آليات الضخ شيوعا هي الضخ الكهربائي والضوئي. في الضخ الكهربائي، تستخدم تيارات من الجسيمات المشحونة طاقتها الحركية أو طاقتها الكهروستاتيكية لإثارة ذرات الوسط أو الأنظمة الشبيهة بالذرات من مستوياتها الأرضية إلى مستويات إثارتها. في الضخ الضوئي، يُشعّ ضوء ذو شدة عالية على الوسط الليزري، محدثا إثارة مشابهة.

إن أهم أمثلة الضخ الضوئي هي ليزرات الحالة الصلبة المطعّمة بالأيونات. إن هذه الليزرات مبنية على أيونات ذرية مطمورة في مواد جامدة شفّافة. الأيونات الشائعة هي التيتانيوم (Ti) والنيوديميوم (Nd) والإيربيوم (Er)، وغالبا ما تطمر في السافير (الياقوت)، أو خليط اليتريم والألومنيوم والجارنيت (YAG)، أو الزجاج. ليزرات ياقوت التيتانيوم Ti:Sapphire ، ونيوديميوم اليتريم والألومنيوم والجارنيت Nd:YAG وزجاج الإربيوم Er:Glass مهمة في البحث العلمي والتقنية وأنظمة الاتصالات الضوئية الحديثة. عندما تتعرض هذه الأوساط الليزرية لضوء شديد السطوع، فإن أيوناتها تصبح مثارة، ويمكنها أن تعمل كمتذبذبات أو مضخمات ليزرية (الأشكال ٥،٣،١٤ و ٦،٣،١٤).

تحقق من فهمك #٣: ليس بهذه السرعة، يا 007 (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

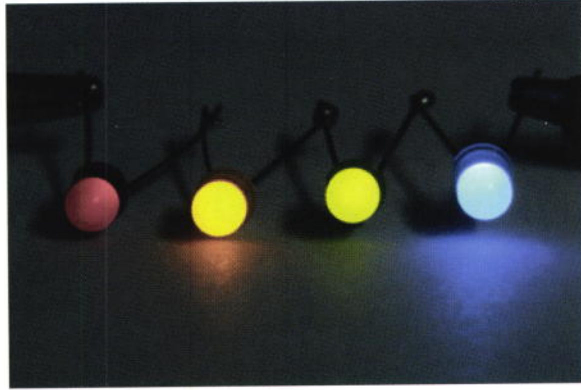
يستخدم المخبر السري 007 في فيلم سينمائي ليزراً يدوياً صغيراً جدا لحرق ثقب خلال صفيحة معدنية سميكة. بدلالة القدرة، لماذا من المستحيل أساسا صناعة مثل هذا الليزر؟

الدايودات (الصمامات الثنائية) الباعثة للضوء والدايودات الليزرية

أكثر الليزرات المُضخة كهربائيا شيوعا هي الليزرات الدايودية. توجد هذه الليزرات في المؤشرات، وقارئات الشفرات الخيطية (barcodes)، والطابعات، ومشغّلات الأقراص المدمجة CD وأقراص الفيديو الرقمية DVD، وهي مرتبطة ارتباطا وثيقا بالدايودات الباعثة للضوء، والتي تشابه الدايودات الاعتيادية التي ناقشناها في القسم ١٢-١. ولكن في حين أن الدايودات الاعتيادية مصممة فقط للتحكّم بالتيارات مع هدر أقل قدرة ممكنة، إلا أن الدايودات الليزرية والباعثة للضوء معدلة لكي تُنتج ضوءاً.

عندما يكون توصيل الدايود أمامياً ويتدفق التيار من مصعده إلى مهبطه ، فإن إلكترونات مستوى التوصيل في المهبط ذي نوع - س تسير عبر الوصلة م - س لكي تُصبح إلكترونات مستوى التوصيل في المصعد ذي النوع-

بإذن لو بلومفيلد



شكل ٧,٣,١٤: هذه الدايودات الباعثة للضوء متصلة على التسلسل، بحيث يتدفق التيار نفسه خلال كل واحد منها بشكل متتابع. ولكن فجواتها النطاقية المختلفة تتسبب في بعثها لضوء ذي ألوان مختلفة.

م. في الواقع، يكون المصعد عند ذلك في حالة إثارة، أي يكون له إلكترونات في مستوى التوصيل ومستويات تكافؤ فارغة.

ما يحدث بعد ذلك يعتمد على خصائص الدايود. في دايود السيليكون المعتاد، تنزاح إلكترونات التوصيل هذه لمستويات التكافؤ الفارغة دون إنتاج أي ضوء ذي قيمة. إن التركيب الشريطي للسيليكون له خصائص تعيق انبعاث الضوء، فتُنتج معظم انتقالات الإلكترونات اهتزازات داخلية تُسخّن الدايود بدلا من إنتاج ضوء.

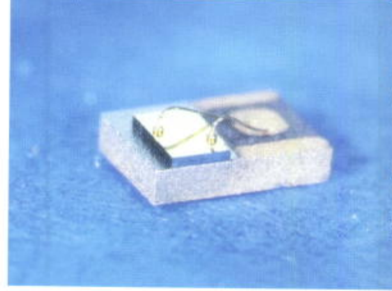
ولكن في الدايودات المتخصصة المصنوعة من أشباه موصّلات أكثر دهشة، تخضع إلكترونات مستوى التوصيل في المصعد ذي النوع - م لانتقالات إشعاعية مراراً إلى مستويات تكافؤ فارغة وبالتالي تبعث ضوءا. تتكوّن الدايودات الباعثة للضوء أساساً من توليفة من الجاليوم والإنديوم والألومنيوم والأرسنيد والفسفور والنيتروجين وتُعرف بالـ LED. تأتي الدايودات الباعثة للضوء بأي لون من ألوان قوس المطر، بما في ذلك تحت الأحمر، والأحمر، والبرتقالي، والأصفر، والأخضر، والأزرق، والبنفسجي، وفوق البنفسجي (شكل ٧,٣,١٤). وفي حين أنه يوجد دايودات باعثة للضوء بيضاء أيضًا، إلا أنها في الحقيقة دايودات باعثة للضوء بنفسجية أو فوق بنفسجية مبطنة أو مغلفة بمادة فسفورية داخلية تُضيء لونا أبيض.

لون الدايودات الباعثة للضوء مرتبط مباشرة بالطاقة المتحررة عندما ينزاح إلكترون في المصعد نوع - م من مستوى توصيل إلى مستوى تكافؤ. إن الوحدة الأكثر موائمة لقياس تلك الطاقة هي الإلكترون فولت (اختصارا eV) - وهي الطاقة المتحررة عندما تواجه وحدة واحدة أولية من الشحنة الكهربائية هبوطاً فولطياً مقداره 1V 1eV (يساوي $1.6021\ J \times 10^{-19}$). في الدايودات الباعثة للضوء الأحمر الاعتيادي، يحرر الإلكترون 1.9eV من الطاقة أثناء إزاحته من مستوى التوصيل إلى مستوى التكافؤ ويمكنه أن يُنتج فوتونا طاقته 1.9eV، وبما أن الطاقة والتردد مرتبطان بالمعادلة (١,٢,١٤) والتردد والطول الموجي مرتبطان بالمعادلة (١,٢,٩)، فإن ذلك الفوتونذا الطاقة 1.9eV له تردد مقداره 4.6×10^{14} Hz وطول موجي 650nm.

لتشغيل وإنتاج هذه الفوتونات ذات الطاقة 1.9eV، يجب أن يكون الدايود الباعث للضوء الأحمر موصلا توصيلا أماميا بهبوط فولطي مقداره 1.9V على الأقل. يستخدم الدايود الحامل للتيار ذلك الهبوط الفولطي لإدخال إلكترونات في شريط توصيل المصعد ، حيث لها طاقات مقدارها 1.9eV فوق شريط التكافؤ. إن العديد من هذه الإلكترونات تحرر بالتتابع طاقاتها الإضافية على هيئة فوتونات ضوئية ذات طاقة مقدارها 1.9eV.

كلما صغر الطول الموجي للضوء المنبعث من الدايود الباعث للضوء زادت الطاقة التي يجب أن يحررها كل إلكترون عند إزاحته من مستوى التوصيل إلى مستوى التكافؤ ووجب زيادة الفجوة النطاقية لشبه الموصّل. إن الدايود الباعث للضوء البنفسجي الذي يبعث ضوءاً ذا 400nm يتطلب فجوة نطاقية مقدارها حوالي 3.1eV لإنتاج فوتوناته بطاقة مقدارها 3.1eV. ويحتاج ذلك الدايود الباعث للضوء أيضا إلى توصيل أمامي بفولطية تزيد عن 3.1V. تفسّر الزيادة في الهبوط الفولطي والمطلوبة من الدايودات الباعثة للضوء القريب من طرف الطيف البنفسجي سبب احتياج تلك الدايودات الباعثة للضوء إلى مصادر قدرة ذات فولطية أعلى.

بإذن شركة أس دي أل SDL



شكل ٨،٣،١٤: هذه الرقاقة الصغيرة جدا من شبه الموصّل هي دايود ليزري يبعث شعاعا ضوئيا مترابطا ذا شدة عالية عندما يتدفق تيار خلاله.

من المؤسف أن أقل من ربع الإلكترونات المرسلة عبر وصلة م - س في الدايودات الباعثة للضوء تنجح في إضاءة الغرفة. وعلى الرغم من أن جزءاً كبيراً من هذه الإلكترونات تبعث فوتونات، إلا أن معظم الفوتونات يُعاد امتصاصها من قِبل شبه الموصّل قبل أن تغادر الدايود الباعث للضوء ؛ حيث أن نفس الانتقالات الإشعاعية التي تبعث هذا الضوء (مستوى توصيل ← مستوى تكافؤ) يمكنها أيضا أن تمتصه (مستوى التكافؤ ← مستوى التوصيل). وبالرغم من هذه الصعوبات، فإن الدايودات الحديثة الباعثة للضوء يمكنها أن تُنتج ضوءاً مرئياً بكفاءات في الطاقة مساوية لكفاءات المصابيح الفلورية. تستمر كفاءات الدايودات الباعثة للضوء بالارتفاع مع عمرها التشغيلي وما هي إلا مسألة وقت قبل أن تصبح الأسلوب الأساسي للإضاءة.

إن الدايود الليزري يشابه إلى حد كبير الدايود الباعث للضوء LED، إلا أن الدايود الليزري يستخدم انتقالاته الإشعاعية لتضخيم الضوء. وبما أن هذا التضخيم يمكن أن يحدث فقط عندما يتجاوز انبعاث الضوء امتصاص الضوء، فإن الدايود الليزري يجب أن يُنتج انقلاباً تعدادياً بين مستوى ليزر علوي ومستوى ليزر سفلي.

يحقق الدايود الليزري مثل هذا الانقلاب عن طريق تركيز التيار داخل وصلة م - س ضيقة جدا مصنوعة من شبه موصّلات مطعّمة بكثافة عالية. يُدخل التيار الشديد كثافة عالية من الإلكترونات إلى شريط توصيل المصعد ، حيث تستقر سريعا في مستويات التوصيل ذات الطاقة الأقل - مستوى الليزر العلوي. يُفرّغ التطعيم الكثيف معظم مستويات تكافؤ المصعد ذات الطاقة العالية - مستوى الليزر السفلي. بوجود الكثير من الإلكترونات في مستوى الليزر العلوي والقليل منها في مستوى الليزر السفلي، يكون للدايود انقلاب تعدادي ويمكنه أن يُضخّم الضوء.

معظم الدايودات الليزرية تعمل كمتذبذبات ليزرية (شكل ٨،٣،١٤)، فتضخّم ضوءها المنبعث تلقائيا إلى أن يُشكّل شعاعا مترابطا ذا شدة عالية. في الغالب يكون طرفا المصعد نفسه عاكسا بما يكفي للعمل كمرايا فيشكل متذبذباً ليزرياً متكاملاً. ولكن لتركيز ضوء الليزر في اتجاه واحد وللتحكّم بخصائص شعاعه، تتخذ العديد من الدايودات الليزرية تركيبات وطلاءات معقدة.

وكما في الدايودات الباعثة للضوء ، يعتمد الطول الموجي للدايود الليزري ولونه أساساً على الفجوة النطاقية لمصعده . تم تطوير دايودات ليزرية حمراء وتحت الحمراء أولا وتم دمجها سريعاً في العديد من المنتجات المنزلية. لقد كانت عملية تطوير دايودات ليزرية لها فجوات نطاقية أكبر وأطوال موجية أقصر شاقة. ولكن طيف ألوان الدايود الليزري قد امتد الآن لفوق البنفسجي، ومع كون هذه الليزرات ذات الطول الموجي القصير قد أصبحت أقل تكلفة وأكثر اعتماداً، فقد بدأت بالظهور في منتجات نستخدمها في الحياة اليومية.

تحقق من فهمك # ٤: الإنارة (للإجابة، انظر صفحة ٤٦٧)

عندما تزيد التيار المتدفق خلال مصباح ضوئي متوهّج، فإنه يسطع وينزاح لونه نحو الطرف الأزرق من الطيف. إذا زدت التيار المتدفق خلال الدايود الباعث للضوء أو دايود ليزري، ماذا يحدث لسطوعه وللونه؟

خاتمة الفصل الرابع عشر

استكشفنا في هذا الفصل نشوء وتحرك الضوء. في قسم ضوء الشمس، نظرنا في كيفية استطارة الضوء أثناء عبوره خلال الغلاف الجوّي وكيف ينعطف وينعكس عندما يتحرّك من مادة إلى أخرى. كما فحصنا تأثيرات التداخل التي تحدث عندما تتبع الموجة الضوئية أكثر من مسار للوصول لموقع محدّد وتعلمنا كيف تقلل النظارات الشمسية المستقطبة من الوهج.

في قسم مصابيح التفريغ، درسنا التفريغات الكهربائية في الغازات ورأينا أن الذرات المثارة عن طريق

التصادمات بجسيمات مشحونة يمكنها فيما بعد أن تبعث ضوءاً خلال انتقالات إشعاعية. درسنا الألوان الأولية للضوء لرؤية كيف أن المادة الفسفورية في السطح الداخلي لأنبوب فلوري قادرة على إنتاج صورة طبق الأصل تقريبا من ضوء الشمس الأبيض. وفي قسم الليزرات والدايودات الباعثة للضوء LED، نظرنا في الفرق بين الضوء المألوف غير المترابط والضوء المترابط غير الاعتيادي المنبعث من الليزر، ورأينا أن الليزرات تستخدم انبعاثاً حثّياً لنسخ الفوتونات، بحيث يمكن تضخيم عدد صغير من الفوتونات الابتدائية إلى عدد هائل.

تفسير: فصل ألوان الشمس

ينعطف الضوء عند مروره خلال أوجه بلورة الزجاج أو الوعاء. وبسبب التشتت، تعتمد زاوية كل انعطاف على الطول الموجي للضوء قليلاً، بحيث تتبع الألوان المختلفة لضوء الشمس مسارات مختلفة قليلا خلال البلورة. عند خروج الضوء من البلورة، تسير أطواله الموجية المتعددة في اتجاهات مختلفة بعض الشيء؛ فترى ألواناً. يرتقي تتابع الألوان من الأطوال الموجية الطويلة إلى الأطوال الموجية القصيرة، أو العكس. فترى لونا أحمر، وبرتقالياً، وأصفر، وأخضر، وأزرق، ونيلياً، وبنفسجياً ، أو العكس – وهي ألوان قوس المطر.

ملخّص الفصل

كيفية عمل ضوء الشمس

ينشأ ضوء الشمس عند سطح الشمس الذي تبلغ حرارته 5800°C، فعندما تتسارع جسيمات مشحونة كهربائيا هناك ذهابا وإيابا بسرعة وتبعث موجات كهرومغنطيسية. يسير ضوء الشمس هذا بسرعة الضوء خلال الفراغ إلى أن يصل الغلاف الجوّي للأرض، حيث يتباطأ هناك قليلا وبعضه يُستطار باستطارة رايلي. يستطير الضوء ذو الطول الموجي القصير باستطارة رايلي أكثر من الضوء ذي الطول الموجي الطويل، فلذا تبدو السماء زرقاء.

حينما يمر ضوء الشمس خلال الأجسام المختلفة، فإنه يتباطأ وتنفصل ألوانه. فعندما يمر ضوء الشمس خلال قطرات مطر ساقطة، فإن أطواله الموجية المختلفة تتبع مسارات مختلفة وتكوّن أقواس مطر. وحينما ينعكس ضوء الشمس من الأغشية الرقيقة مثل فقاعات الصابون، فإن موجاته تنقسم وقد تتبع عدة مسارات مختلفة وصولا لنفس المكان، فتتداخل هذه الموجات الضوئية مع بعضها البعض بحيث تظهر بعض الموجات قوّية وساطعة بينما تبدو أخرى ضعيفة خافتة. يعتمد التداخل على الأطوال الموجية للضوء فلذا تبدو الأغشية الرقيقة ملونة ساطعة.

كيفية عمل مصابيح التفريغ

تُنتج مصابيح التفريغ ضوءا بتمرير تيارات كهربائية خلال غازات. تتحوّل هذه الغازات إلى بلازما موصّلة كهربائيا بملئها بجسيمات مشحونة، إما بتعريضها لتدرّجات فولطية قوّية أو بإدخال إلكترونات إليها من الإلكترودات الساخنة. ما أن تتكوّن البلازما، يمكن لتيار أن يمر خلالها، وتتسبب التصادمات داخل البلازما الحاملة للتيار في انبعاث ضوء من جسيمات الغاز.

يبعث المصباح الفلوري ضوءا مرئيا عندما يتعرض الطلاء الفسفوري على جدار الأنبوب الداخلي لضوء فوق بنفسجي ذي 254 nm والذي ينتج داخل الأنبوب من تفريغ بخار الزئبق ذي الضغط المنخفض. يثير هذا الضوء فوق البنفسجي الطلاء الفسفوري ويتسبب في بعثه ضوءا مرئيا. على النقيض من ذلك، تستخدم مصابيح الزئبق وهاليدات المعدن والصوديوم تفريغات لإنتاج ضوء مرئي مباشرة ولا تستخدم المواد الفسفورية. فبتشغيلها تحت الضغط العالي، تنتج مصابيح التفريغ هذه مدى واسعاً نسبياً من الطيف الضوئي وتوفّر إضاءة ذات كفاءة في الطاقة.

كيفية عمل الليزرات والدايودات الباعثة للضوء *LED*

تضخّم الليزرات الضوء من خلال عملية الانبعاث الحثّي. في هذه العملية، تنتقل الطاقة إلى الذرات أو الأنظمة الشبيهة بالذرات الموجودة في الوسط الليزري. في حين يمكن لهذه الأنظمة أن تبعث ضوءا تلقائيا، إلا أنه يمكن حثّها لبعث نسخ من فوتون مار. فعندما يمر فوتون بالطول الموجي الصحيح خلال نظام مثار، فإنه من المحتمل أن يتنازل ذلك النظام عن طاقته

المختزنة ببعث صورة طبق الأصل من الفوتون الابتدائي. وفي المتذبذب الليزري، تتسبب مرآتان في ارتداد الضوء ذهابا وإيابا خلال الوسط الليزري. يتم نسخ فوتون ابتدائي بشكل لانهائي لإنتاج ضوء مترابط. وتكون إحدى المرآتين شبه شفّافة بحيث يخرج جزء من الضوء من الليزر على هيئة شعاع ليزر.

في الدايودات الباعثة للضوء LED، ينبعث الضوء عندما تخضع الإلكترونات التي عبرت وصلة الدايود م – س إلى مستويات التوصيل في المصعد لانتقالات إشعاعية إلى مستويات التكافؤ الفارغة. يتحدد لون الضوء الناتج من الدايود الباعث للضوء LED أساساً بالفجوة النطاقية للمصعد. يستخدم الليزر الدايودي نفس المفاهيم الخاصة بالدايود الباعث للضوء ، إلا أن انقلاباً تعدادياً يتكوّن بين مستويات التكافؤ الفارغة نسبيا ومستويات التوصيل الممتلئة نسبيا. وبوجود إلكترونات مهيئة لبعث ضوء أكثر من تلك المهيئة لامتصاصه، يمكن لليزر الدايودي أن يُضخِّم الضوء.

قوانين ومعادلات مهمة

١. العلاقة بين الطاقة والتردد: الطاقة في الفوتون الضوئي تساوي حاصل ضرب ثابت بلانك في تردد الموجة الضوئية، أو

الطاقة = ثابت بلانك × التردد (١،٢،١٤)

تحقق من فهمك – الإجابات

١٤-١ ضوء الشمس

١. تتسارع الجسيمات المشحونة في اللهب الساخن ذهابا وإيابا وتبعث موجات كهرومغنطيسية والتي تتضمّن الطرف ذا التردد المنخفض من الطيف المرئي.
لماذا: الجسيمات المشحونة المتسارعة في الأجسام الساخنة تبعث ضوءا. كلما زادت حرارة الجسم، زادت سرعة حركة وتسارع الجسيمات المشحونة وزاد تردد الضوء الذي تبعثه تلك الجسيمات. الشمعة ليست ساخنة بما يكفي لبعث ضوء أبيض مثل ضوء الشمس، لذا، فهي تبعث ضوءاً في معظمه محْمراً أو مصفراً.

٢. استطارة رايلي من جسيمات الدخان المجهرية تجعل الضوء الأزرق يستطير أكثر من الضوء الأحمر فيُعطي الهواء وهجا أزرق.
لماذا: عندما يُضاء الهواء في غرفة مظلمة مليئة بالدخان بضوء مسلّط ساطع أو مصدر آخر من الضوء الأبيض، فإن جسيمات الهواء الصغيرة جدا تتسبب في استطارة بعض من الضوء. وعندما تنظر للهواء أمام خلفية سوداء يمكنك رؤية هذا الوهج. وبما أن استطارة رايلي تؤثر أكثر في الضوء الأزرق، فإن الهواء يبدو مزرقّاً.

٣. يوضّح الألماس ظاهرة التشتت بحيث تتبع ترددات ضوء الشمس المختلفة مسارات مختلفة بعض الشيء خلال أسطح الألماس المصقولة. تخرج الألوان المختلفة لضوء الشمس من الألماس سائرة في اتجاهات مختلفة قليلة، بحيث يمكنك رؤيتها منفردة.
لماذا: أحد الجوانب المبهجة في الألماس هو تشتيته القوّي. فهو يعطف الضوء البنفسجي أكثر بكثير من الضوء الأحمر بحيث ينفصل ضوء الشمس إلى ألوانه المختلفة بينما يمر خلال الألماس. تساعد الأسطح المقطوعة بذكاء في فصل الألوان المنفردة.

٤. من التداخلات بين الضوء المنعكس من السطح العلوي والسطح السفلي لطبقة الزيت الطافية.
لماذا: الغشاء الرقيق لأي شيء على الماء سيبدو ملوّنا تقريبًا بسبب التداخل. من كل موجة ضوئية ساقطة على الغشاء ينعكس جزء منها من السطح العلوي، وجزء من السطح السفلي. هاتان الموجتان المنعكستان تتداخلان مع بعضهما البعض بطريقة تعتمد على الطول الموجي وتجعل الطبقة تبدو ملوّنة وساطعة. إن الألوان المختلفة تقابل سماكات مختلفة للغشاء الرقيق.

٥. معظم الضوء الذي ينعكس من على الماء مستقطب أفقيا. تحجب النظارة الشمسية الضوء المستقطب أفقيا بحيث يكون معظم ما تراه هو الضوء من داخل بركة الماء.
لماذا: ضوء الشمس المنعكس من سطح أفقي معظمه موجات مستقطبة أفقيا. بحجب الضوء المستقطب أفقيا، تلْغي النظارات الشمسية المستقطبة هذا الضوء الشمسي المنعكس تقريباً، ومعظم ما تراه هو الضوء القادم من تحت السطح. إذا أدرت النظارات الشمسية جانبيا، فإنها ستحجب استقطاب الضوء المخالف ومعظم ما تراه سيكون الضوء المنعكس. جرّبها بنفسك.

١٤-٢ مصابيح التفريغ

١. برتقالي.
لماذا: خلاياك المخروطية الحسّاسة للأحمر والأخضر والأزرق لها نفس الاستجابة لهذا المزيج من الضوء كاستجابتها لضوء صافٍ ذي طول موجي 600 nm. مثل هذا الضوء يبدو برتقاليا، فترى لونا برتقالياً عند النظر في هذا المزيج.

٢. يقلل من كفاءة طاقة المصباح.
لماذا: على الرغم من أن المرشّح الأزرق يغيّر طيف الأطوال الموجية بحيث يزيد مقدار الضوء الأزرق المغادر للمصباح بالنسبة للضوء الأحمر، إلا أن المرشّح يقوم بذلك بامتصاص بعض من الضوء الأحمر. يسخن المرشّح، والقليل من القدرة الكهربائية المستخدمة من قِبل المصباح تُغادره كضوء مرئي.

٣. عندما تضيف النار طاقة لذرة وتزيحها إلى حالة إثارة، فإنها تبعث فوتونات لكي تعود إلى حالتها الأرضية. تتحدد طاقة كل فوتون، وتردده ولونه بالفروق في الطاقة بين حالات الذرة.

لماذا: ينتج كل لون في الألعاب النارية من نوع معيّن من الذرات. بعض الذرات، مثل الاسترونشيوم والليثيوم، تبعث ضوءا معظمه أحمر عندما تعود لحالاتها الأرضية، بينما تبعث ذرات الباريوم ضوءا أخضر، وتبعث ذرات النحاس ضوءا أزرق مخضَراً، وتبعث ذرات الصوديوم ضوءا أصفر - برتقالياً.

٤. سوف ترى فقط وهجاً (أزرق - أبيض) خافتاً من المصباح لأن معظم الضوء الناتج من تفريغ الزئبق هو ضوء فوق بنفسجي غير مرئي.

لماذا: بدون الطلاء بالمادة الفسفورية يُنتج الأنبوب الفلوري القليل من الضوء المرئي. الطلاء الفسفوري مطلوب لتحويل ضوء التفريغ فوق البنفسجي إلى ضوء مرئي. لكن حتى لو كنت قادرا على رؤية الضوء فوق البنفسجي، فإنك سترى القليل منه مغادراً للأنبوب. إن الأنبوب مصنوع من الزجاج والذي يمتص جميع الضوء فوق البنفسجي تقريباً والذي طوله الموجي أقصر من 350nm. حتى في الأنبوب الفلوري الاعتيادي، أي ضوء فوق بنفسجي لم يحوّل إلى ضوء مرئي بواسطة المادة الفسفورية سيُمتص من قِبل الأنبوب الزجاجي.

٥. لبدء تشغيل العديد من المصابيح، فإن إلكتروداتها يجب أن تُسخّن بدرجة كبيرة لتصبح حمراء، وكثيراً ما يمكنك رؤية ضوء منبعث من هذه الإلكترودات/الفتائل الساخنة.

لماذا: في معظم تركيبات الأنابيب الفلورية، تُسخّن الفتائل إلى درجات حرارة عالية قبل بدء التفريغ مباشرة. بعد ذلك تطرد الطاقة الحرارية إلكترونات من الفتيلة بحيث يمكنها أن تحمل تيارا خلال الغاز.

٦. ترتفع درجة حرارة أنبوب التفريغ الصغير ذي الضغط العالي، مبخرا بذلك المزيد من الزئبق.

لماذا: عندما يبدأ تشغيل إنارة الشوارع، فإن ضغط ذرات الزئبق داخلها منخفض وتبعث القليل من الضوء المرئي. بينما يبدأ التفريغ بتسخين الأنبوب، فإن المزيد من ذرات الزئبق تتبخّر إلى أن يصبح جميع الزئبق داخل الأنبوب غازياً في نهاية الأمر.

٣-١٤ الليزرات والدايوات الباعثة للضوء LED

١. يُنتج الكشّاف الضوئي ضوءا غير مترابط، بوجود العديد من الموجات الضوئية المستقلة التي تساهم بمجالاتها الكهربائية المستقلة للمجال الكهربائي الإجمالي. إذا كنت ستقيس ذلك المجال الإجمالي، فإنك ستجده غير مرتّب.

لماذا: بما أن فوتونات الضوء غير المترابط مستقلة، فإن مجالاتها الكهربائية الفردية لا تتذبذب سوية. في أي مكان وزمان، ستتجمّع المجالات الكهربائية الفردية بصورة عشوائية ومعقدة. مع مرور الزمن، سيتذبذب هذا المجال الإجمالي عشوائيا، ولكن الضوء المترابط، والذي فيه كل فوتون مثيل للفوتونات الأخرى، له مجال كهربائي أكثر ترتيبا لأن جميع الفوتونات تساهم بشكل متساوٍ.

٢. سيصبح أكثر سطوعا.

لماذا: في المعتاد يبعث المتذبذب الليزري شعاعا ضوئيا بأقصى سطوع يستطيع الحصول عليه، بناء على مقدار الطاقة المختزنة في الوسط الليزري. يمكن لهذا الشعاع الضوئي أن يُضخّم أكثر بإرساله خلال مضخّم ليزري منفصل. تستخدم معظم الليزرات عالية القدرة متذبذباً ليزرياً ومضخّماً ليزرياً واحداً أو أكثر لإنشاء أشعة ضوئية ساطعة جدا.

٣. سيحمل الضوء في مثل هذا الشعاع الليزري قدرة هائلة. لا بد لشيء ما أن ينقل تلك القدرة إلى الوسط الليزري، مهمة مستحيلة في وحدة يدوية صغيرة جدا.

لماذا: تأتي القدرة في الشعاع الليزري من الوسط الليزري. لابد أن الوسط الليزري تحصّل عليها من مكان آخر. فبما أن البطاريات ليست قادرة على توصيل آلاف من الواط من القدرة الكهربائية، فإنه من غير المحتمل أن الليزرات اليدوية ذات القدرة العالية ستُصنّع. حتى إذا توفّر مصدر قدرة مناسب، فإن هذه الليزرات ستميل للتسخين. إن عملية تحويل القدرة إلى ضوء ليس ليست ذا كفاءة عالية، ومعظم الطاقة ستصبح طاقة حرارية في مكونات الليزر. تتطلب الليزرات عملية تبريد لإزالة هذه الطاقة المهدرة.

٤. يصبح الدايود أكثر سطوعا، لكن لونه لا يتغيّر بشكل كبير.

لماذا: يعتمد سطوع الدايود على عدد الإلكترونات التي تعبر وصلته م - س كل ثانية، وزيادة ذلك العدد يزيد من السطوع. لكن يعتمد لون ضوء الدايود الذي يبعثه على فجوته النطاقية وبالتالي لا يتغيّر كثيرا عندما تزيد التيار في الدايود.

دقق في أرقامك - الإجابات

٣-١٤ مصابيح التفريغ

١. 6.626×10^{-28} J.

لماذا: بما أن ثابت بلانك هو 6.626×10^{-34} J·s وتردد موجة الراديو هو 10^6Hz أو 106 دورة/ثانية، فإن الطاقة لكل فوتون تُعطى بالمعادلة (١،٢،١٤) كالتالي:

الطاقة = $(6.626 \times 10^{-34}\ \text{J·s})\cdot(10^6\ \text{cycle/s})$

= 6.626×10^{-28} J

هذه الطاقة صغيرة جدا بحيث يكون من المستحيل مشاهدة الخاصية الجسيمية لموجات الراديو.

تمارين

١. ما هو الطول الذي يجب أن يكون عليه الهوائي لاستقبال أو إرسال ضوء أحمر بشكل جيّد؟

٢. ما هو الطول الذي يجب أن يكون عليه الهوائي لاستقبال أو إرسال ضوء بنفسجي بشكل جيّد؟

٣. عندما ينظر رواد الفضاء في مكوك فضائي للأسفل نحو الأرض، فإن الغلاف الجوّي للأرض يبدو أزرق. لماذا؟

٤. عندما مشى رواد الفضاء على سطح القمر، كان بإمكانهم رؤية النجوم على الرغم من أن الشمس كانت قائمة فوق رؤوسهم. لماذا لا يمكننا رؤية النجوم عندما تكون الشمس قائمة فوق الرأس؟

٥. إذا سلّطت كشّافاً ضوئياً بشكل أفقي على كأس مليئة بالماء، فإن الزجاج سيعيد توجيه شعاع الضوء. كيف؟

٦. يستخدم عرض الليزر الضوئي أشعة ضوئية عالية الشدة، وعندما يظل أحد هذه الأشعة ثابتا، يمكنك رؤية المسار الذي يأخذه خلال الهواء. ما الذي يجعل من الممكن لك رؤية هذا الشعاع حتى وإن لم يكن موجهاً نحوك؟

٧. لجعل الأشعة في عرض الليزر الضوئي (انظر تمرين ٦) مرئية أكثر، فإنها في الغالب توجّه إلى ضباب أو دخان. لماذا تجعل مثل هذه الجسيمات الأشعة مرئية أكثر؟

٨. لماذا يمكنك رؤية انعكاس صورتك في بركة ماء هادئة؟

٩. استخدم مفاهيم الانكسار والانعكاس والتشتت لتفسير لماذا يبعث الألماس العديد من الألوان عندما يمر ضوء الشمس خلال أسطحه.

١٠. للألماس معامل انكسار مقداره 2.42. إذا وضعت ألماساً في ماء، فسترى انعكاسات من على أسطحه ، ولكن إذا وضعته في سائل معامل انكساره ٢،٤٢، لا يمكن رؤية الألماس. لماذا يكون غير مرئيًا وكيف يكون هذا التأثير مفيداً للجوهريّ أو العالم بالأحجار الكريمة؟

١١. لماذا يبدو ركام من ذرات السكر أبيض بينما تبدو قطعة كبيرة من الحلوى (سكر جامد) شفّافة؟

١٢. يحتوي الورق على عدد من ألياف السليولوز الشفافة، وهي المادة الكيميائية الأساسية في الخشب والقطن. لماذا يبدو الورق أبيض، ولماذا يصبح شفّافا نسبيا عندما يبتلّ؟

١٣. كثيراً ما يمكنك رؤية أغشية زيتية على أسطح وحل مائي في يوم ممطر. لماذا تبدو هذه الأغشية ملوّنة ساطعة؟

١٤. عندما تكون شريحتان من الزجاج فوق بعضهما البعض، فإنك في الغالب تستطيع أن ترى حلقات ملوّنة من الضوء المنعكس. كيف يمكن للأسطح الزجاجية المتقاربة أن تتسبب في ظهور هذه الحلقات الملوّنة؟

١٥. إذا كنت ترتدي نظارات شمسية مستقطبة وأردت أن ترى مَن يرتدي نظارات شمسية مستقطبة غيرك، فما عليك إلا أن تدير رأسك جانبيا وتنظر مَن مِن الناس الآن لهم نظارات شمسية تبدو معتمة تماماً. لماذا ينفع هذا الاختبار؟

١٦. لماذا من الأسهل النظر لداخل الماء عندما تنظر مباشرة لأسفله مقارنة بالنظر إليه بزاوية ضحلة؟

١٧. الضوء القريب من 480nm له لون يُسمّى سماوياً. أي مزيج من الألوان الأساسية للضوء يجعلك ترى اللون السماوي؟

١٨. ما الاختلاف بين مزيجين من الأضواء الحمراء والخضراء والذي يجعلك ترى لونا أصفر وبرتقالياً، على التوالي؟

١٩. ما هي ألوان الضوء التي يمتصها الطلاء الأحمر؟

٢٠. ما هي ألوان الضوء التي يمتصها الطلاء الأصفر؟

٢١. إذا أضأت طلاءً أحمر بضوء أزرق صافٍ، ما اللون الذي سيبدو به ذلك الطلاء؟

٢٢. تسمح مرايا الماكياج الفاخرة للمستخدمين باختيار إما إضاءة فلورية أو متوهجة لتطابق الإضاءة التي سيُرون فيها. لماذا يؤثر نوع الإضاءة على مظهرهم؟

٢٣. حينما تكون ذرة الصوديوم في حالتها الأرضية لا يمكنها بعث ضوء. لم لا؟

٢٤. عندما تكون ذرة الصوديوم في حالة إثارتها ذات أقل طاقة، فإنه يمكنها بعث ضوء. لماذا؟

٢٥. أنت تعرّض غازاً من ذرات الأرجون إلى ضوء بطاقات فوتونات لا تقابل فرق الطاقة بين أي زوج من المستويات في ذرة الأرجون. فسّر ماذا يحدث للضوء.

٢٦. التفريغ في مزيج من الغازات له احتمال أكبر أن يبعث طيفا ضوئيا أبيض مقارنة بتفريغ غاز وحيد. لماذا؟

٢٧. إذا تم استبدال بخار النيون ذي الضغط المنخفض الموجود في إعلان نيوني ببخار زئبق ذي ضغط منخفض، فإن الإعلان لن يبعث أي ضوء مرئي تقريبا. لم لا؟

٢٨. زيادة القدرة الداخلة لمصباح متوهّج يجعل فتيلته أكثر سخونة وضوءه أكثر بياضا. لماذا لا تغير زيادة القدرة لإعلان نيوني من لونه؟

٢٩. في حين أن العديد من المنتجات التي يُتخلّص منها بعد الاستخدام لم تعد تحتوي على الزئبق، والذي يعد مصدر تلوث، إلا أن الأنابيب الفلورية مازالت تحتوي عليه. لماذا لا يستطيع المصنعون إلغاء الزئبق من أنابيبهم؟

٣٠. عندما يتقادم القماش الأبيض يبدأ بامتصاص ضوءاً أزرق. لماذا يُعطي هذا الامتصاص القماش مظهرا أصفر اللون؟

٣١. لإخفاء الاصفرار (انظر تمرين ٣٠)، يُطلى القماش في الغالب بجسيمات فلورية «منيرة» تمتص الضوء فوق البنفسجي وتبعث ضوءا أزرق. في ضوء الشمس، يظهر هذا القماش المطلي أبيض، على الرغم من امتصاص بعض ضوء الشمس الأزرق. فسّر ذلك.

٣٢. تستخدم ومضات الكاميرا تفريغات في غازات الزينون والكربتون ذات الضغط المرتفع لإنتاج ضوء أبيض ذي شدة عالية لفترة وجيزة. لماذا من المهم استخدام الومضات لهذه الذرات المعقدة؟

٣٣. يستخدم مشغّل الأقراص المدمجة شعاعاً من ضوء الليزر لقراءة القرص، عن طريق تركيز ذلك الضوء على بقعة قطرها أقل من $1\mu m$ ($10^{-6}m$). لماذا لا يمكن للمشغّل استخدام مصباح ضوئي متوهّج زهيد الثمن للقيام بهذه المهمة، بدلا من الليزر الأكثر غلاء؟

٣٤. لماذا لا يستطيع مشغّل الأقراص المدمجة (تمرين ٣٣) استخدام دايود باعث للضوء (LED) بدلا من ليزره الدايودي؟

٣٥. فسّر لماذا تكون الموجة الكهرومغنطيسية المنبعثة من محطة إذاعية مترابطة – مكافئة للضوء المترابط لكن بتردد منخفض.

٣٦. إحدى الساعات الذرية الأكثر دقة هي الميزر الهيدروجيني. يستخدم هذا الجهاز جزيئات هيدروجين مثارة لنسخ فوتونات مايكروويف ذات تردد 1.42 GHz. في الميزر، يكون للجزيئات مستويان فقط: مستوى الميزر العلوي ومستوى الميزر السفلي (والذي هو في الواقع المستوى الأرضي). لإبقاء الميزر عاملاً، يضيف نظام كهرومغنطيسي باستمرار جزيئات هيدروجين مثارة إلى الميزر، ويزيل نظام ضخ جزيئات هيدروجين في الحالة الأرضية من الميزر باستمرار. لماذا يتطلب الميزر إمداداً ثابتاً من جزيئات جديدة مثارة؟

٣٧. لماذا يجب ضخ جزيئات الحالة الأرضية لخارج الميزر الهيدروجيني (انظر تمرين ٣٦) بأسرع ما يمكن لإبقائه يعمل بشكل جيّد؟

٣٨. في حين تفقد بعض الأوساط الليزرية طاقة عن طريق الانبعاث التلقائي للضوء، إلا أن أوساطاً أخرى تستطيع أن تختزن طاقة لمدة زمنية طويلة. لماذا يكون وقت التخزين الطويل ضرورياً في الليزرات التي تُنتج نبضات ضوئية عالية الشدة؟

٣٩. استخدم أحد أوائل الليزرات ياقوتا صناعيا كوسطه الليزري. لكن ليزر الياقوت (Ruby laser) هو ليزر ذو ثلاثة مستويات؛ مستوى ليزره السفلي هو مستواه الأرضي. لماذا يجعل هذا الترتيب كفاءة ليزر الياقوت منخفضة نسبيا؟

٤٠. إذا لم تكن معظم مستويات التكافؤ ذات الطاقة العالية في مصعد الليزر الدايودي نوع – م فارغة، فإنه سيصبح قليل الكفاءة نسبيا ومن المحتمل أنه لن يبعث ضوءاً ليزرياً إطلاقا. لمَ لا؟

٤١. لماذا لا تؤثر زيادة التيار المار خلال الدايود الباعث للضوء على لون ضوئه؟

٤٢. لماذا تؤثر زيادة التيار المار خلال الدايود الباعث للضوء على سطوع لونه؟

مسائل

١. للضوء الأصفر من مصباح بخار الصوديوم تردد مقداره 5.08×10^{14} Hz. ما مقدار الطاقة التي يحملها كل فوتون من ذلك الضوء؟

٢. إذا بعث مصباح بخار الصوديوم ذي الضغط المنخفض ضوءا أصفر قدرته 50 W (انظر مسألة ١)، فكم عدد الفوتونات التي يبعثها كل ثانية؟

٣. أشعة إكس لها تردد 1.2×10^{19} Hz. ما مقدار الطاقة التي يحملها فوتون هذه الأشعة؟

٤. يحمل فوتون ضوئي معيّن طاقة مقدارها 3.8×10^{-19} J. ما هو تردد هذا الضوء وطوله الموجي ولونه؟

٥. إذا بعثت محطة إذاعة AM قدرة مقدارها 50,000W في موجة الراديو التي ترسلها والتي ترددها 880kHz، فكم عدد الفوتونات التي تبعثها كل ثانية؟

٦. إذا بعثت محطة إذاعة FM قدرة مقدارها 100,000W في موجة الراديو التي ترسلها والتي ترددها 88.5MHz، فكم عدد الفوتونات التي تبعثها كل ثانية؟

الفصل ١٥

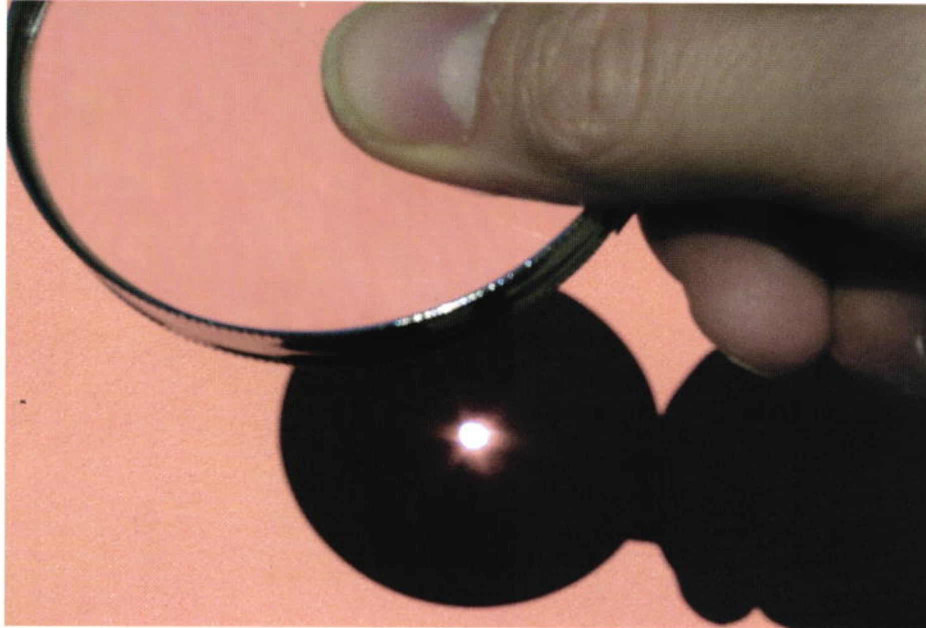
البصريات

تقوم العديد من الأجهزة حولنا بمهام مفيدة عن طريق التلاعب بالضوء. تسجّل الكاميرات صور الأجسام التي أمامها بينما تسمح لنا عدسات التكبير رؤية التفاصيل التي سنغفل عنها عند النظر بأعيننا فقط. وأدوات أخرى، مثل مشغلات الأقراص المدمجة (CD) أو أقراص الفيديو الرقمية (DVD)، تستخدم الضوء بطرق ليس لها أي علاقة بالرؤية. ولكن جميع هذه الأشياء تتلاعب بالضوء باستخدام تقنيات متشابهة - أي تقنيات بصرية.

في حين كانت الأدوات البصرية مثل العدسات والمنشورات موجودة منذ مئات السنين، إلا أن تطوّرات التقنيات الحديثة سارعت في تطوير البصريات. مثلما أن اختراع الترانزيستور أسرع في نمو صناعة الإلكترونيات، فكذلك اختراع الليزر أسرع في نمو صناعة البصريات. هذان الحقلان ليسا بعيدين عن بعضهما البعض من جوانب عديدة، وهناك أمل أنه في يوم ما ستصبح الحواسيب أجهزة بصرية بقدر ما هي إلكترونية.

تجربة: تركيز ضوء الشمس

هناك العديد من الأجهزة المنزلية التي تتلاعب بالضوء، وأكثرها ألفة هي العدسة المكبّرة. تعطف العدسة المكبّرة أشعة الضوء نـحو بعضها البعض بينما تمر خلال العدسة. في هذا الفصل، سنرى كيف يمكن لعدسة مجمّعة بسيطة من هذا النوع أن تُكبّر جسماً أو تُلقي بصورته على سطح حسّاس للضوء. حاليا، سنستخدمها ببساطة لتجميع أشعة الضوء سوية. في يوم صحو تكون فيه الشمس قائمة فوق الرأس، خذ عدسة مكبرة وورقة غامقة اللون للخارج لمكان لا يوجد فيه أي مواد قابلة للاشتعال بالجوار. سوف تستخدم ضوءاً من الشمس لتسخين الورقة إلى أن تحترق، فكن على استعداد لإطفاء حريق إن لزم ذلك. امسك العدسة المكبرة فوق الورقة تماما وارفع العدسة ببطء للأعلى نـحو الشمس. تأكد من أن العدسة مدارة بحيث يواجه سطحها الشمس. سترى دائرة ساطعة تظهر على الورقة الغامقة اللون، وستُصبح تلك الدائرة أصغر وأصغر حينما ترفع العدسة. تنعطف أشعة ضوء الشمس للداخل بينما تمر خلال العدسة وتتجمّع سوية بينما



بإذن لو بلومفيلد

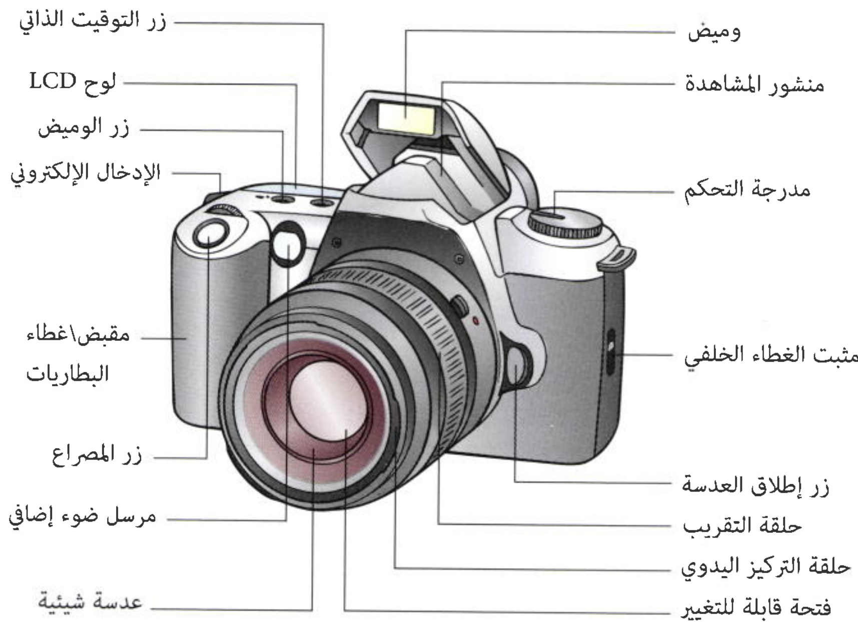
تتجه نحو الورقة. احذر أن تلامس هذه الدائرة الساطعة من الضوء جلدك لأنها ستحرقك. إذا لم تكن البقعة دائرية، حاول أن تميل العدسة بشكل مختلف.

عندما تكون العدسة على ارتفاع مناسب فوق الورقة، فإن الدائرة الضوئية ستصل لأقل حجم، وستظهر الدائرة كقرص أبيض ساطع والذي هو في الواقع صورة الشمس ذاتها. إذا كانت العدسة المكبرة عريضة بما فيه الكفاية والشمس ساطعة بما فيه الكفاية، فإن الورقة ستبدأ بإصدار دخان. عندها تكون صورة الشمس ساطعة جدا بحيث أنها قادرة على تسخين الورقة إلى درجة حرارة اشتعالها. إذا كانت العدسة كبيرة جدا، قد تبدأ الورقة بالاحتراق بشعلة.

يمكنك أن تُسقط صور أجسام أخرى مضاءة بسطوع على ورقة بيضاء. حاول أن تتنبأ بأحجام واتجاهات تلك الصور. شاهد ماذا يحدث. هل تحققت من تنبئك؟ حاول أن تقيس المسافة إلى جسم بالنظر للبعد الذي يجب أن يكون بين العدسة والورقة للحصول على صورة واضحة.

دليل الفصل

إن عملية تجميع الضوء لتكوين بقعة صغيرة أو صورة جسم بعيد هي موضوع مألوف في البصريات. في هذا الفصل، سنفحص العديد من الأنظمة المستندة على هذا النوع من التلاعب بالضوء: (١) الكاميرات و(٢) التسجيل والاتصالات الضوئية. في قسم الكاميرات، سنرى كيف تعطف العدسات الضوء لتكوين صور وكيف تُستخدم هذه الصور لإنشاء صور فوتوغرافية. في قسم التسجيل والاتصالات الضوئية، سنستكشف أدوار الليزر في البصريات أثناء البحث في العديد من التأثيرات البصرية المبتكرة. لمزيد من المعلومات التمهيدية، انتقل إلى ملخص الفصل في صفحة ٤٩٣.



١٥-١ الكاميرات

خلال القرنين التي مرت منذ اختراعها، أصبحت الكاميرات سهلة الاستخدام جداً. الشيء الذي بدأ كهواية لقليل من المتحمسين قد تطوّر لنشاط يومي. لكن بالرغم من كل التطورات التقنية، مازال التصوير الفوتوغرافي يستخدم العديد من المبادئ المماثلة لتلك التي استخدمها في القرن التاسع عشر. مازالت الكاميرات تستخدم عدسات لإسقاط الصور على الأسطح الحسّاسة للضوء، ومازال الفوتوغرافيون يقلقون حول الحصول على التعريض المناسب للضوء، والتركيز الجيّد، وتجنّب غبش الحركة السريعة. في هذا القسم، سوف نفحص بعض المبادئ التي تجعل الكاميرات تعمل.

أسئلة للتفكير

لماذا تكون عدسات الكاميرات الباهظة الثمن معقدة جدا، بوجود العديد من القطع الزجاجية المنفصلة؟ لماذا يبدو أن العدسة الطويلة تقرّب الأجسام أكثر إليك؟ ما الذي يقوم به ثقب الكاميرا؟ كيف تؤثر سرعة مصراع الكاميرا على الصورة؟

تجارب يمكن القيام بها

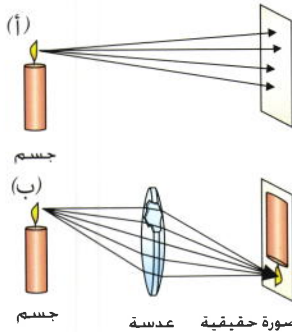
النشاط الأساسي للكاميرا - وهو إسقاط صورة المنظر الذي أمامك على مستشعر الصورة الخاص بها - لا يتطلب أكثر من عدسة تكبير بسيطة. في الواقع، يمكنك استخدام أي عدسة بسيطة مقوّسة للخارج في منتصفها، بما في ذلك عدسات النظارات لإنسان يُعاني من بُعد النظر دون استجماتزم أو نظارات القراءة. قف في غرفة مظلمة مقابل نافذة،امسك ورقة بيضاء بحيث تكون موازية للنافذة وحرّك العدسة ذهابا وإيابا أمام الورقة. تأكد من أن العدسة ذاتها موازية للنافذة. عليك أن تجد مسافة تُسقِط فيها العدسة صورة واضحة للنافذة على الورقة. ستجد أن المنظر يبدو مقلوبا رأسا على عقب ومعكوساً وأن الصورة تُصبح غير واضحة إذا حركت العدسة نحو الورقة أو بعيدا عنها. كما ستجد أنه عندما تكون صورة النافذة واضحة جداً فإن المنظر الخارجي يصبح غير واضح والعكس بالعكس. في أي اتجاه يجب أن تحرك فيه العدسة لتركيز صورة الأجسام الأكثر بعدا؟

اثقب قطعة من الورق المقوّى واستخدمها لتغطية كل شيء عدا مركز العدسة. ستصبح الصورة الآن أغمق، لكنها ستكون أيضا أكثر وضوحاً على مدى واسع من الأبعاد عن الورقة. إذا كان الثقب ضيقا بما فيه الكفاية، فسيتركز كل شيء في نفس الوقت تقريباً. من الواضح أن قطر العدسة ومقدرتها على تركيز عدة أشياء في نفس الوقت مرتبطان ببعضهما البعض ارتباطا وثيقا. لماذا؟

العدسات والصور الحقيقية

عندما تأخذ صورة للمنظر أمامك، تعطف عدسة كاميراتك الضوء من ذلك المنظر إلى صورة حقيقية على سطح حسّاس للضوء. الصورة الحقيقية هي نمط ضوئي ساقط في الفراغ أو على سطح، والذي يعيد إنتاج النمط الضوئي للمنظر الأصلي تماما. وبما أن الصورة الحقيقية المسقطة تبدو مثل المنظر الذي تقوم بتصويره، فتسجيل الضوء في ذلك المنظر يُكافئ تسجيل المنظر ذاته.

في حين كان ذلك السطح الحسّاس للضوء يوما ما فيلماً فوتوغرافياً، إلا أن الكاميرات الرقمية أصبحت تستبدل تدريجيا الفيلم بمستشعرات صور إلكترونية. من حسن الحظ أن السطحين الحساسين للضوء يمكن تبادلهما أساسا، فيمكننا الإشارة لهما بمستشعرات الصور: أحدهما إلكتروني والآخر كيميائي ضوئي.



شكل ١،١،١٥: (أ) بدون عدسة، يضيء ضوء الشـمعة مستشعر صور بشكل منتظـم. (ب) عند وضع عدسـة بين الشـمعة والمستشـعر، فإنهـا تجمّع الضوء مـن كل نقطة على الشـمعة سـوية على سطح المستشعر، مشكّلة صـورة حقيقيـة للشـمعة مقلوبـة ومعكوسة. يجب اختيار المسافة بين العدسة والمستشـعر بشكل صحيح، وإلا ستصبح الصورة مغبّشة.

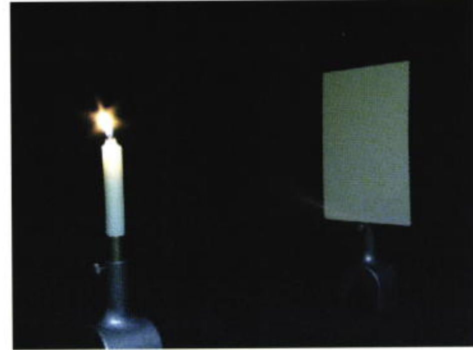
لا تحدث الصور الحقيقية دون مساعدة. فعندما يسقط ضوء من شمعة مباشرة على مستشعر صورة، فإنه يُنتج استضاءة منتشرة فقط (الأشكال ١،١،١٥ أ و ٢،١،١٥ أ)، ولا يمكنك بالنظر إلى المستشعر معرفة شكل الشمعة لأن الضوء الذي يغادر الشمعة يسير في كل الاتجاهات واحتمال اصطدامه بأعلى المستشعر هو نفس احتمال اصطدامه بأسفله.

ولهذا تحتاج الكاميرا إلى عدسة، وهي جسم شفّاف يستخدم الانكسار لتكوين الصور. إن الضوء المار خلال العدسة ينعطف مرتين، مرة عندما يدخل للزجاج أو البلاستيك ومرة أخرى عندما يغادره. في عدسة الكاميرا، عملية الانعطاف هذه تأتي بمعظم الضوء سوية من نقطة واحدة في الشمعة لنقطة واحدة على المستشعر. وكما ترى من الأشكال (١،١،١٥ ب) و(٢،١،١٥ ب)، فإن الصورة الحقيقية المتكونة هي مقلوبة ومعكوسة، ويحدث هذا الانقلاب للصورة الحقيقية بالنسبة للجسم دائماً عندما تكوّن عدسة واحدة صورة حقيقية.

يسمح الشكل المقوّس لعدسة الكاميرا بتكوين صورة حقيقية، حيث ينعطف الضوء المار خلال النصف العلوي من العدسة نـحو الأسفل بينما ينعطف الضوء المار خلال النصف السفلي للأعلى، وبما أن عدسة الكاميرا تعطف الأشعة الضوئية نـحو بعضها البعض، فهي عدسة مجمّعة. يمكنك أن ترى كيف تكوّن الصورة في الشكل (١،١،١٥ ب) بتتبع بعض أشعة الضوء المغادرة من نقطة واحدة في الشمعة.

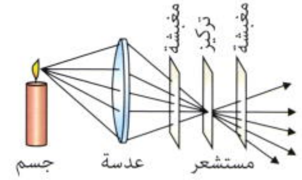
يسير الشعاع العلوي من لهب الشمعة أفقيا نـحو الجزء العلوي للعدسة. حينما يدخل الشعاع الضوئي إلى العدسة ويتباطأ فإنه ينعطف نـحو الأسفل. وينعطف الشعاع مرة أخرى عندما يغادر العدسة ويسير للأسفل نـحو أسفل مستشعر الصورة.

بإذن لو بلومفيلد





شـكل ٢،١،١٥: (أ) عندمـا يسـقط ضوء الشمعة مباشرة على ورقـة، فإنـه لا يُنتج أي صـورة. (ب) لكـن عند وضع عدسـة بين الشـمعة والورقة فإنها تكـوّن صـورة حقيقية مقلوبـة للهب الشـمعة على الورقة.

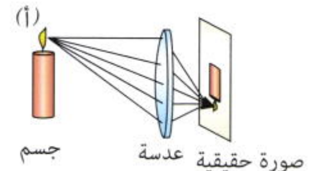


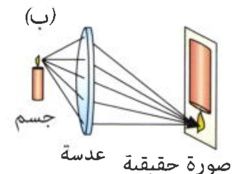
شكل ٣،١،١٥: تتركّز الصورة الحقيقية فقط عندما يكون مستشعر الصورة عند المسافة الصحيحة من العدسة. إذا كان المستشعر أقرب أو أبعد من اللازم من العدسة، تصبح الصورة مغبّشة.

يسير الشعاع السفلي من الشمعة للأسفل نحو أسفل العدسة وينعطف للأعلى حينما يدخل العدسة. ينعطف الشعاع مرة أخرى للأعلى حينما يغادر العدسة ويسير أفقيا نحو أسفل مستشعر الصورة.

يصل هذان الشعاعان الضوئيان لمستشعر الصورة عند نفس النقطة. ينضم لهذين الشعاعين العديد من الأشعة الأخرى من نفس جزء لهب الشمعة، بحيث تتكوّن بقعة ساطعة على المستشعر. إجمالا، يُضيء كل جزء من الشمعة بقعة معيّنة على مستشعر الصورة، بحيث تكوّن العدسة صورة كاملة للشمعة على المستشعر.

لكن يمكن للعدسة أن تعيد الضوء سوية لتكوين صورة واضحة على المستشعر فقط إذا كانت المسافة الفاصلة بين العدسة والمستشعر هي المسافة الصحيحة (شكل ٣،١،١٥). فإذا كان المستشعر قريباً جداً من العدسة فلن يكون للضوء مساحة للتجمّع، وإذا كان المستشعر بعيداً جداً عن العدسة، عندها يبدأ الضوء بالتباعد مرة أخرى قبل أن يصل إلى المستشعر. في كلا الحالتين، تكون الصورة على المستشعر مغبشة. تتركّز الصورة الحقيقية للشمعة فقط على بعد مسافة معينة واحدة من العدسة.





شكل ٤،١،١٥: (أ) يسير الضوء من شمعة بعيدة في نفس الاتجاه تقريبا وتركّزه العدسة بسهولة. تتكون الصورة الحقيقية بالقرب من العدسة (ب) يتباعد الضوء من الشمعة القريبة، ويصعب على العدسة عطفه ليعود نحو بعضه البعض. تتكوّن الصورة الحقيقية بعيدا عن العدسة. إذا كانت الشمعة قريبة جدا من العدسة، لا تتكوّن أي صورة حقيقية على الإطلاق.

إذا تحركت الشمعة نحو عدسة الكاميرا أو بعيداً عنها، فإن المسافة بين العدسة ومستشعر الصورة يجب أن تتغيّر أيضا (شكل ٤،١،١٥). فعندما تكون الشمعة بعيدة جدا فإن جميع أشعتها الضوئية والتي تمر خلال العدسة تصل متوازية تقريبا لبعضها البعض، والانعطاف الداخلي الذي تسببه العدسة يجعل هذه الأشعة تتجمّع سوية بسرعة. تتركّز هذه الأشعة بالقرب من العدسة نسبيا وهناك يجب أن يكون المستشعر (شكل ٤،١،١٥ أ). إن صورة الشمعة على المستشعر هي أصغر بكثير من الشمعة ذاتها لأن أشعة الضوء لديها فقط مسافة قصيرة لكي تتحرك للأعلى أو للأسفل بعد مغادرتها العدسة.

عندما تكون الشمعة قريبة، فإن أشعتها الضوئية المارة خلال العدسة تتباعد بسرعة والانعطاف الداخلي الذي تسببه العدسة بالكاد يكفي لجعل هذه الأشعة تتجمّع على الإطلاق، ونتيجة لذلك، تتركّز الأشعة بعيدا عن العدسة نسبيا (شكل ٤،١،١٥ ب). تكون صورة الشمعة على المستشعر كبيرة جدا لأن الأشعة الضوئية لديها مسافة كبيرة يمكنها أن تتحرك خلالها للأعلى أو للأسفل بعد مغادرة العدسة.

ولأن الأجسام البعيدة والقريبة تكوّن صورا حقيقية عند مسافات مختلفة من عدسة الكاميرا، فلا يمكن أن يكون كلاهما متركّزا على مستشعر الصورة نفسه. عندما تأخذ صورة إنسان يقف أمام جبل، يمكن لأحدهما فقط أن يكون متركزا. لكن إذا كنت تقبل أن تتنازل عن بعض من الوضوح الحاد، فإن العدسة يمكنها في بعض الأحيان أن تكوّن صورة مقبولة لكلا الجسمين.

تحقق من فهمك # ١: رؤية الأضواء (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

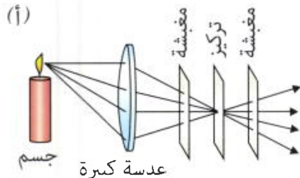
إذا أمسكت بعدسة تكبير على بعد المسافة الصحيحة فوق ورقة بيضاء، سترى صورة لأضواء الغرفة العلوية على الورقة. فسّر ذلك.

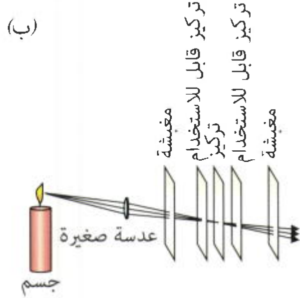
التركيز وقطر العدسة

الكاميرا ذات الاستخدام الواحد هي مجرد صندوق وعدسة. تُسقط العدسة صورة حقيقية للمنظر الذي أمامها على مستشعر الصور في الكاميرا. يُنير ضوء الصورة الحقيقية مستشعر الصور، والذي يسجّل الصورة بشكل دائم. في حين يمكن أن يكون للكاميرا أيضاً مصراع يبدأ ويوقف التعرّض، وضوء وميضي يوفّر الضوء الإضافي،

وآلية تهيئ التقاط الصورة التالية، فليس هناك المزيد لهذه الكاميرا البسيطة.
ولكن هناك قيوداً لتصميم الكاميرا ذات الاستخدام الواحد. أحد أشد هذه القيود هو أنه لا يمكنك أن تركزها - فللكاميرا مسافة محدّدة بين العدسة ومستشعر الصور. ومع ذلك، تتمكن الكاميرا من تكوين صور حقيقية واضحة نسبيا على المستشعر، حتى عند وجود أجسام على أبعاد متعددة من الكاميرا. إن هذه الكاميرات البسيطة مجدية لأنها تستخدم عدسات ضيقة (ذات أقطار صغيرة)، حيث تجمّع العدسة الضيقة ضوءا أقل من العدسة العريضة لكنها لا تتطلب تركيزاً - أي تعديل المسافة بين العدسة ومستشعر الصور.

لأن العدسة العريضة (ذات قطر كبير) تجمّع الأشعة سوية من اتجاهات متعددة، فيجب أن تركزها (شكل ٥,١,١٥ أ)؛ حتى وإن كان مستشعر الصور قريبا قليلا من العدسة أو بعيدا قليلا عنها، فإن الصورة المسجلة ستكون مغبشة. لكن العدسة الضيقة تكوّن صورة واضحة معقولة حتى بدون تركيز. إن أي أشعة من جزء واحد من المنظر والتي تنجح في المرور خلال العدسة الضيقة يجب أن تكون قريبة جدا من بعضها، وقربها المبدئي يعني أن هذه الأشعة المتجمّعة تُضيء فقط جزءاً بسيطاً من مستشعر الصور حتى وإن كان المستشعر ليس عند المسافة الصحيحة عن العدسة بالضبط (شكل ٥,١,١٥ ب). بما أن مستشعر الصور لا يمكنه تسجيل كل تفصيل دقيق على أية حال، فإن الصورة التي تتكوّن عليه لا يجب أن تكون عند تركيز تام. ونتيجة لذلك، يمكن للكاميرا ذات العدسة الضيقة والتي ليس لديها آلية لتعديل التركيز أن تأخذ صورة جيدة.
من المؤسف أن هذه الكاميرات البسيطة تجمّع ضوءا قليلا جدا وتحتاج مستشعرات صور حسّاسة جدا للضوء. هذه المستشعرات عالية السرعة لا يمكنها أن تُسجّل صوراً فوتوغرافية واضحة كالمستشعرات المنخفضة السرعة. علاوة على ذلك، الصور الناتجة من الكاميرات البسيطة تفتقر إلى التفاصيل الدقيقة؛ ففي حين يكون كل شيء مركّزاً تقريبا، إلا أن معظم الأشياء تكون غير واضحة بعض الشيء إذا نظرت بعناية أو قمت بتكبير الصورة.





شكل ٥,١,١٥: (أ) تجمّع العدسة الكبيرة الكثير من الضوء لكن بؤرتها حرجة. تكون الصورة مغبشة إلا عند البؤرة الفعلية. (ب) تُجمّع العدسة الصغيرة ضوءا أقل لكن صورتها أوضح نسبيا في أي مكان قريب من البؤرة.

تستخدم الكاميرات الأكثر تعقيدا عدسات أعرض تجمّع ضوءا أكثر وتعرّض مستشعرات الصور بسرعة أكبر. كما أنها تعدّل تلقائيا المسافة بين العدسة والمستشعر. فهي تتعرف على الجسم الذي تريد تصويره وتضع عدسة الكاميرا في موقع بحيث تُسقط صورة واضحة على المستشعر. وبينما تركّز الكاميرا، يمكنك في الغالب رؤية مكونات في العدسة تتحرك للأمام أو للخلف لتصل للمسافة الصحيحة من المستشعر.
حتى الكاميرا ذات العدسة العريضة يمكنها أن تستغل خدعة العدسات الضيقة للتركيز. فتحتوي عدستها على حجاب حاجز داخلي يقلل من فتحة عدستها أو قطرها الفعلي. الحجاب الحاجز هو حلقة من الأشرطة المعدنية لها فتحة مركزية، ويمكن لهذه الأشرطة أن تتأرجح للداخل أو الخارج، فتغيّر قطر فتحة الحجاب الحاجز ومعه فتحة العدسة (شكل ٦,١,١٥).

بإذن لو بلومفيلد



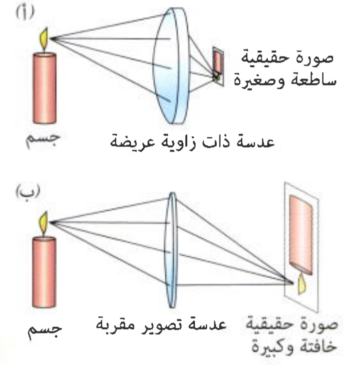


شكل ٦,١,١٥: يمكن تقليص فتحة هذه العدسة بغلق حاجبها الداخلي، فتخفت صورتها لكن تزيد حدة تركيزها.

عندما تكون فتحة عدستها ضيقة، فإن الكاميرا المعقدة تُحاكي الكاميرا البسيطة. إن كل شيء تقريباً متركّز فعلياً في نفس الوقت، وفي مثل هذه الحالة، يكون للكاميرا عمق في التركيز. في الواقع، يمكن للكاميرا المعقدة أن تجعل أهم الأجسام مركّزاً جداً، بحيث تُنتج صوراً أفضل من تلك التي تنتجها الكاميرات البسيطة. ولكن تضييق فتحة العدسة يقلل مقدار الضوء الواصل لمستشعر الصور أيضاً. لا بد للمنظر الذي أمام الكاميرا أن يكون إما ساطعا جدا أو التعرّض يجب أن يكون طويلا جدا، فلا يمكنك أن تحصل على شيء من لا شيء.

في حين أن زيادة اتساع فتحة عدسة كبيرة يُحسّن استغلال مقدرتها على تجميع الضوء، إلا أن التركيز يصبح بعد ذلك مهما جداً. حتى الخطأ الصغير في المسافة بين العدسة والمستشعر سيُنتج صورة غير واضحة، فعمق التركيز صغير جدا. هذه المقايضة، بين تجميع الضوء وعمق التركيز، هي صراع مستمر للمصورين الفوتوغرافيين. ولكن في بعض الأحيان يستغل المصورون عمق التركيز الصغير في العدسات العريضة لكي يجعلوا خلفية الصورة أو مقدمتها غير واضحة عمدا. يتبنّى ضبط الكاميرا على معيار الصور الشخصية هذه الطريقة لإنتاج صور واضحة للأشخاص أمام خلفيات غير واضحة.

في أوقات أخرى، يختار الفوتوغرافيون تعرضاً طويلاً وفتحات عدسات ضيقة لكي يجعلوا المنظر بأكمله في وضع تركيز. يسلك معيار الكاميرا لتصوير المناظر هذا المسلك، بحيث يظهر كل شيء في الصورة بتفاصيل كاملة. ولكي تُلتقط حركات سريعة مع الاحتفاظ بتركيز ذي عمق كبير، يستخدم الفوتوغرافيون ضوءاً ومضياً لجعل المنظر أكثر سطوعا وللتقليل من التعريض. من المؤسف أن الضوء الوميضي للكاميرا غير فعّال في إضاءة المناظر البعيدة ويمكنه أن يُنتج انعكاسات غير محببة من النوافذ والعيون. يُشدّد معيار الكاميرا للقطات الرياضية على التعرّض القصير لكي يتجنب عدم الوضوح الناتج عن سرعة الحركة، حتى وإن تطلب ذلك فتحة عدسة كبيرة وعمق تركيز قصيراً.



شكل ٧,١,١٥: (أ) للعدسة ذات الزاوية العريضة بُعد بؤري قصير وتشكّل صورة حقيقية صغيرة وساطعة بالقرب من العدسة. (ب) عدسة التصوير المقربة (التيليفوتوغرافية) لها بُعد بؤري طويل وتشكّل صور حقيقية كبيرة خافتة بعيدا عن العدسة.

تحقق من فهمك # ٢: الصور الشخصية (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

بينما تأخذ صورة لصديقك، مع فتح فتحة عدسة كاميراتك الكبيرة لأكبر ما يمكن، تلاحظ أن الخلفية غير واضحة. فسّر ذلك.

الأبعاد البؤرية وأعداد f

تصنّف العدسات وفق كميتين: البعد البؤري وعدد f. البُعد البؤري لعدسة ما هو المسافة بين العدسة والصورة الحقيقية التي تكوّنها لجسم بعيد جدا. على سبيل المثال، إذا تكونت صورة حقيقية للقمر على مسافة 100mm (4in) خلف عدسة معينة، فإن تلك العدسة لها بُعد بؤري مقداره 100mm. تتراوح الأبعاد البؤرية لعدسات الكاميرات من أقل من 10mm (0.4in) في العديد من الكاميرات الصغيرة إلى حوالي 2m (7ft) في الكاميرات المستخدمة لتصوير الطبيعة.

عندما يمر ضوء من منظر خلال عدسة ذات بُعد بؤري قصير، فإن المنظر يتركّز بالقرب من تلك العدسة وتُنتج صورة صغيرة نسبيا على مستشعر الصور. ولأن البُعد البؤري الطويل للعدسة يسمح للضوء المار خلالها بالانتشار أكثر قبل أن يتركّز، فإنه يُنتج صورة حقيقية كبيرة على المستشعر.

العدسة «الاعتيادية» لكاميرا معيّنة لها بُعد بؤري يسمح لجميع الأجسام في مجال رؤيتك المركزي أن يقعوا في محيط مستشعر الصور. عندما تُمسك بالصورة الفوتوغرافية النهائية على بُعد 30cm تقريبا(1ft) من عينيك، فإن الأجسام في الصورة تظهر بنفس الحجم تقريباً الذي كانت عليه عندما تم أخذ الصورة. إن البُعد البؤري لعدسة كاميرا اعتيادية هو تقريبا 1.5 ضعف العرض الأفقي لمستشعر صورها.

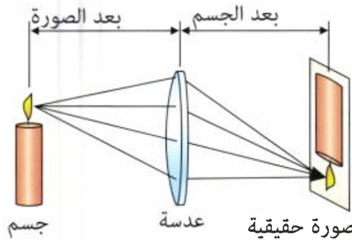
العدسة ذات الزاوية العريضة لها بُعد بؤري أقصر من العدسة الاعتيادية (شكل ٧,١,١٥ أ). الصورة التي تُسقطها على مستشعر الصور أصغر ولكنها أكثر سطوعا، ومعظم الأجسام في مجال رؤيتك الكامل تظهر في الصورة الفوتوغرافية. إن العدسة المقّربة (التيليفوتوغرافية) لها بُعد بؤري أطول من العدسة الاعتيادية (شكل ٧,١,١٥ ب)، والصورة التي تسقطها على المستشعر أكبر لكنها أخفت، وفقط الأجسام في مركز المنظر تظهر في الصورة الفوتوغرافية.
بالإضافة إلى تحديد مكان تكوين صورة جسم بعيد، فإن البُعد البؤري لعدسة كاميرا يربط بين بُعد الجسم وبُعد الصورة. بُعد الجسم هو المسافة بين العدسة والجسم الذي تصوره. بُعد الصورة هو المسافة بين العدسة والصورة الحقيقية التي تكوّنها (شكل ٨,١,١٥). تُسمّى العلاقة معادلة العدسة ويمكن كتابتها بمعادلة لفظية:

$$\frac{1}{\text{البعد البؤري}} = \frac{1}{\text{بعد الجسم}} + \frac{1}{\text{بعد الصورة}} \qquad (١,١,١٥)$$

ورمزيا:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i}$$

وفي لغة الحياة اليومية: كلما بعُد الجسم، تكوّنت صورته أقرب إلى العدسة.



شكل ٨,١,١٥: العلاقة بين بعد الجسم وبعد الصورة والبعد البؤري للعدسة تعطى بمعادلة العدسة.

جدول ١,١,١٥: العديد من الكاميرات، وعرض مستشعر الصور التي تستخدمه، وعدساتها الاعتيادية

نوع الكاميرا	عرض المستشعر	العدسة الاعتيادية
كاميرا رقمية معتادة	8mm	12mm
كاميرا 35mm	36mm	50mm
كاميرا متوسطة 2¼بوصة	2¼بوصة	80mm
كاميرا التصوير الشخصي 5 بوصة	5بوصة	180mm

معادلة العدسة

واحد مقسوم على البُعد البؤري يساوي مجموع واحد مقسوم على بُعد الجسم وواحد مقسوم على بُعد الصورة.

وفقا لمعادلة العدسة، بُعد الصورة لجسم بعيد يساوي البُعد البؤري للعدسة. يتفق هذا مع نقاشنا السابق عن البُعد البؤري. ولكن عندما يكون الجسم قريباً، يُصبح بُعد الصورة أكبر من البُعد البؤري، ولهذا تتحرك عدسة الكاميرا بعيدا عن مستشعر الصور بينما تركّز الصورة في مدى أقرب. وعندما يُصبح بُعد الجسم أقل من البُعد البؤري، فإن بُعد الصورة يُصبح سالبا ولا تتكوّن أي صورة حقيقية إطلاقا. لهذا لا يمكنك أن تُركّز جسماً قريباً جدا من العدسة.

يصف عدد f لعدسة شدة سطوع الصورة الحقيقية التي تكوّنها على مستشعر الصور، بحيث تشير أعداد f الصغيرة للصور الأكثر سطوعا. يتم حساب عدد f بقسمة البُعد البؤري للعدسة على قطرها. وبما أن العدسات ذات الأبعاد البؤرية الطويلة تُنتج طبيعياً صوراً أكبر وأخفت على مستشعر الصور، فإن عدد f يأخذ في الاعتبار كلاً من مقدرة العدسة على تجميع الضوء وبُعدها البؤري. وبزيادة قطر العدسة تزيد مقدرتها على تجميع الضوء ويقل عدد f الخاص بها. زيادة البُعد البؤري للعدسة تُقلل من سطوع صورتها الحقيقية وتزيد من عدد f. القيام بالاثنين في الوقت ذاته، أي زيادة قطر العدسة والبُعد البؤري بالتساوي، لا يغيّر من السطوع وعدد f. تستخدم معظم الكاميرات المعقدة عدسات ذات أقطار كبيرة بحيث تكون أعداد f الخاصة بها في الغالب أقل من ٤. بما أنه من الصعب تصنيع عدسة ذات قطر أكبر من بُعدها البؤري، فإن أقل عدد f عملي هو 1 تقريبا. وبما أن العدسات ذات الأبعاد البؤرية الطويلة تحتاج فتحات كبيرة لإبقاء أعداد f الخاصة بها صغيرة، فإن بعض العدسات المقرّبة (التيلفوتوغرافية) تكون ضخمة.

يسمح لك الحجاب الحاجز داخل العدسة بتقليل فتحة العدسة وبالتالي زيادة عدد f الخاص بها. الزيادة بمعامل 2 في عدد f تُقابل تناقصاً بمعامل 2 في قطر العدسة الفعلي وتناقصاً بمعامل 4 في مساحة العدسة لتجميع الضوء. وبالتالي عندما تضاعف عدد f للعدسة، فيجب أن تعوّض بزيادة زمن التعريض أربعة أضعاف. على الرغم من أن غلق فتحة العدسة يزيد من عمق تركيز العدسة، إلا أنه يتطلب زمن تعريض أطول.

تحقق من فهمك # ٣: صور واضحة وساطعة (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

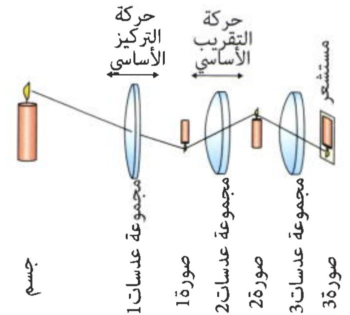
في الأيام المشمسة الساطعة، تلتقط كاميراتك التلقائية صوراً بأعماق تركيز كبيرة، بينما في الأيام الغائمة المظلمة، فإن صورها لها أعماق تركيز أصغر. ما الذي يسبب هذا الاختلاف؟

دقق في أرقامك #١: صورة تفاحة (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٥)

إذا كانت المسافة بين تفاحة وعدسة مجمّعة هي ضعف البُعد البؤري لتلك العدسة، فأين ستتكوّن الصورة الحقيقية للتفاحة؟

تحسين جودة عدسة كاميرا

إن عدسة كاميرا ذات جودة عالية ليست فقط قطعة واحدة من الزجاج أو البلاستيك. بدلا من ذلك، تتكوّن العدسة من العديد من العناصر المنفصلة والتي تعمل سوية كعدسة واحدة. هذا التعقيد يُحسّن من جودة الصورة الحقيقية. للبدء، يتسبب التشتت في عنصر عدسة وحيد في انعطاف الألوان المختلفة للضوء بشكل مختلف وتركيزها عند مسافات مختلفة خلف تلك العدسة. هذه المشكلة، والتي تُعرف بالزيغ اللوني، يمكن حلّها باستخدام العديد من عناصر عدسات مصنوعة من أنواع مختلفة من الزجاج، بمقادير مختلفة من التشتت. هذه العناصر تعوّض بعضها البعض بحيث يكون للعدسة الإجمالية، والتي تُعرف بالعدسة اللالونية (achromat)، تشتت صغير جدا وتكون خالية من مشاكل تركيز الألوان تقريباً.



شكل ٩,١,١٥: يستخدم نوع شائع من عدسات التقريب ثلاث مجموعات من عدسات ثلاثية لإسقاط صورة حقيقية ذات حجم متغيّر على مستشعر الصور. يتم التقريب في الغالب بتحريك مجموعة العدسة الثانية لتغيير أبعاد صورتها وجسمها. مجموعة العدسة الأولى مسؤولة عن التركيز ومجموعة العدسة الثالثة تُسقط الصورة الحقيقية على المستشعر.

بعد تصحيح مشاكل لون الصورة وأي مشاكل تقنية أخرى، فإن عدسة الكاميرا المعقدة قد تحوي أكثر من عشرة عناصر فردية. لغرض استخدام معادلة العدسة، فإن هذه العدسة المعقدة لها مركز فعلي والذي يُحسب منه بُعد الجسم وبُعد الصورة. ولكن وجود العديد من العناصر المنفصلة يُنشئ مشاكل انعكاسات؛ كلما يمر ضوء من الهواء إلى الزجاج أو العكس بالعكس، ينعكس بعضه. لتجنب تكوّن غبش في الصورة الفوتوغرافية بهذا الضوء الشارد والمنعكس، فإنه يتم تغطية العناصر الفردية بطبقة رقيقة من مواد شفافة مضادة للانعكاس. أفضل تغطية هي التي تستخدم تأثيرات التداخل لإلغاء موجات الضوء المنعكسة وتُعطي العدسة انعكاساً بنفسجياً ضعيفاً فقط.

إن العديد من الكاميرات الحديثة مجهزة بعدسات تقريب. عدسة التقريب هي عدسة معقدة يمكنها أن تغيّر حجم الصورة الحقيقية التي تُسقطها على مستشعر الصور، وبتحريك عناصرها بالنسبة لبعضها البعض بعناية، فإنه يمكن لعدسة التقريب أن تُعدّل بُعدها البؤري الفعلي.

يحتوي النوع الاعتيادي من عدسات التقريب على ثلاث مجموعات منفصلة من عناصر العدسات ويُنتج سلسلة من ثلاث صور (شكل ٩,١,١٥). تكوّن المجموعة الأولى من العدسات صورة أولى للمنظر الذي يقع أمام الكاميرا. تكوّن المجموعة الثانية من العدسات صورة ثانية لتلك الصورة الأولى. وتُسقط المجموعة الثالثة من العدسات صورة ثالثة حقيقية للصورة الثانية على مستشعر الصور. يتضمن تقريب العدسة، أي تغيير بُعدها البؤري، تغيير المسافات بين مجموعات العدسات لكي يتغير بُعد جسم مجموعة العدسة الثانية وبُعد صورتها وبالتالي الأحجام النسبية للصورة الأولى والثانية .

بينما تتغيّر عدسة التقريب من بُعد بؤري قصير إلى بُعد بؤري طويل، فإن الصورة التي تُسقطها على المستشعر تُصبح أكبر. يسمح لك هذا التأثير بتكوين الصورة بحيث يملأ المنظر الصورة بأكملها. إن العدسة التي يمكنها تغيير بُعدها البؤري بينما تُحافظ على نفس عدد f وتُبقي الصورة الحقيقية مركّزة على المستشعر هي في الحقيقة إنجاز عظيم.

تحقق من فهمك # ٤: ليست صورة جيّدة (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

إذا استخدمت عدسة تكبير كبيرة لتكوين صورة حقيقية لمصباح فلوري فوق رأسك، ستجد أن أركان المصباح الفلوري غير واضحة ولها ألوان قوس المطر. لماذا تكون جودة الصورة رديئة؟

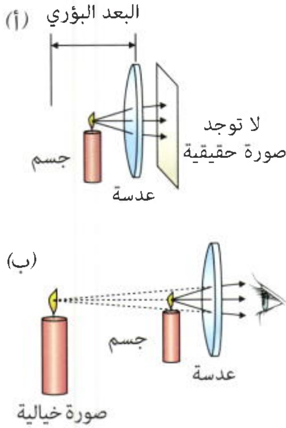
المعيّنة والصور الخيالية

تسمح كاميرات العدسة الوحيدة الانعكاسية أو الـ SLR (Single Lens Reflex) لك بتغيير عدساتها بحيث يمكنك اختيار عدسة مناسبة للمهمة المطلوبة. عندما تُحدّق خلال معيّنة كاميرا SLR (شكل ١٠،١،١٥)، فأنت تنظر لنفس الصورة الحقيقية التي ستسقط على مستشعر الصور أثناء التعريض. إن الضوء الذي تراه يسير خلال العدسة الأساسية للكاميرا، وينعكس من على مرآة، ويسقط على شاشة نصف شفافة داخل الجزء العلوي للكاميرا. أنت تنظر ببساطة لهذه الشاشة فترى الصورة الحقيقية من خلال عدسة مكبرة في العينية. أثناء التعرّض، تنقلب المرآة عن الطريق وتسقط الصورة الحقيقية لوهلة قصيرة على مستشعر الصور.
وبما أن الشاشة والصورة الحقيقية هما فقط على بُعد بوصة أو بوصتين من عينك، فإنه لا يمكنك التركيز عليهما دون مساعدة عدسة عينية. إن العدسة العينية هي عدسة مجمّعة، ولكن في هذه الحالة لا تكوّن صورة حقيقية، وبدلا من ذلك، تكوّن صورة خيالية – صورة تقع على بُعد سالب، أي على الجانب الخاطئ من العدسة!

بإذن لو بلومفيلد

شكل ١٠،١،١٥: توجّه المرآة في مركز كاميرا الانعكاس هذه ضوءاً من العدسة (مزال من هذه الصورة الفوتوغرافية) إلى شاشة التركيز فوقها. أثناء التعريض، تتأرجح المرآة للأعلى لتسمح للضوء من العدسة بالسقوط على مستشعر الصور في ظهر الكاميرا.

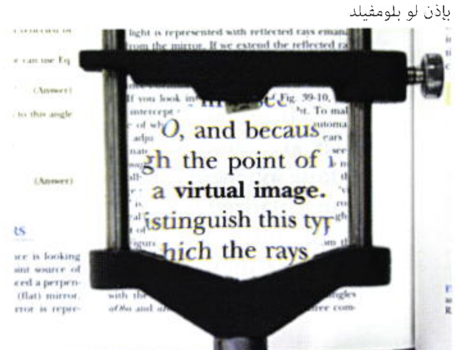
إن الشاشة التي تعرض المنظر الذي تقوم بتصويره قريبة من العدسة العينية بحيث يكون بُعد الجسم أقل من البُعد البؤري للعدسة. ووفقا لمعادلة العدسة، يجب أن يكون بُعد الصورة سالبا وهو كذلك؛ أي تقع الصورة على جانب الشاشة للعدسة العينية (شكل ١١،١،١٥). لا يمكنك أن تضع أصابعك في الضوء وتُسقط هذه الصورة على جلدك لأن الصورة خيالية بدلا من كونها حقيقية.



شكل ١١،١،١٥: (أ) ينحرف الضوء من جسم قريب جدا من عدسة مجمّعة بعد مروره خلال العدسة ولا تتكوّن أي صورة حقيقية. (ب) ترى عينك صورة خيالية كبيرة وبعيدة.

لكن يمكنك أن ترى هذه الصورة من خلال العينية. تقع العينية على مسافة أبعد من الشاشة ذاتها، فيمكن لعينك أن تركز عليها بسهولة لأن الصورة مكبرة، إذ تعمل العدسة العينية كعدسة مكبرة (شكل ١٢،١،١٥). توفّر هذه العدسة تكبيراً لأنك عندما تنظر للشاشة خلالها، فإن صورة الشاشة تُغطّي جزءاً أعرض من مجال رؤيتك، ويتزايد هذا التكبير مع تناقص البُعد البؤري للعدسة العينية، ذلك لأن العدسة العينية ذات البُعد البؤري الأقصر يجب أن تكون قريبة جدا من الشاشة، حيث يمكنها أن تعطف الأشعة الضوئية القادمة من منطقة أصغر لكي تملأ مجال رؤيتك. تم اختيار العدسة العينية في كاميرا اعتيادية بحيث تملأ الشاشة جزءاً مريحاً من مجال رؤيتك، فتسمح لك بفحص الصورة الخيالية بتفاصيل دقيقة وتعديل ضبط العدسة والكاميرا إلى أن تحصل على الصورة الصحيحة التي في مجال رؤيتك. ثم كل ما تحتاج أن تعمله بعد ذلك هو أن تأخذ الصورة.

بإذن لو بلومفيلد



شكل ١٢،١،١٥: تكوّن عدسة التكبير هذه صورة خيالية مكبرة واقعة خلف الكتابة. لا يمكنك أن تلمس الصورة أو تضع أصابعك في ضوئها، لكن يمكنك رؤيتها واضحة بعينيك.

إن الكاميرات ذات العدسات الثابتة كثيراً ما يكون لها نظامان منفصلان للمعيّنة. الكاميرا الرقمية الاعتيادية لها معيّنة إلكترونية صغيرة، والتي تعرض الصورة الحقيقية الساقطة على مستشعر الصور الخاص بها، ولكن العديد من الكاميرات الرقمية وجميع كاميرات الفيلم لها أيضا معيّنات بصرية. ففي حين تتفاوت المعيّنات البصرية في الشكل والتعقيد، إلا أن أفضلها تجمع بين الصور الحقيقية والخيالية. في المعيّنة البصرية ذات الصورة الحقيقية، يُنتج نظام من العدسات والمرايا و/أو المنشورات صورة حقيقية معتدلة للمنظر، ومن ثم تفحص تلك الصورة الحقيقية من خلال عدسة تكبير عينية. إن العدسات التي تُسقط الصورة الحقيقية تقوم بتقريب مع تقريب العدسة الأساسية للكاميرا بحيث ما تراه من خلال المعينة يُشابه ما سيسجله مستشعر الصور في الكاميرا.

تحقق من فهمك # ٥: الصور الحقيقية والخيالية (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

بينما تُحرك عدسة تكبير ببطء نحو الصورة الفوتوغرافية التي أمامك، ترى صورة مقلوبة تكبر وتقترب من عينك. في النهاية تصبح هذه الصورة غير واضحة، وبعدها تظهر صورة جديدة معتدلة مكبرة على جانب العدسة القريب من الصورة الفوتوغرافية. ما الذي يحدث؟

مستشعرات الصور

بمجرد أن تُسقط العدسة صورتها الحقيقية على مستشعر الصور، فإن مهمة مستشعر الصور تسجيل ذلك النمط الضوئي. من المدهش أن كلاً من الفيلم ومستشعرات الصور الإلكترونية يستخدم أشباه الموصلات وكلاهما يستشعران الضوء عندما تُزيح فوتوناته الإلكترونات من مستويات التكافؤ إلى مستويات التوصيل، ولكن كيفية تأثير هذين المستشعرين على انتقالات الإلكترونات مختلفة تماما.

الفيلم الفوتوغرافي يستشعر الضوء بشكل كيميائي ضوئي. توجد بلورات صغيرة من أملاح الفضة مغمورة في الفيلم، وهذه البلورات شبه الموصلة- والتي تتكوّن في الأساس من ذرات فضة وهالوجين- حسّاسة جدا للضوء. فعندما تمتص بلورة هاليد الفضة فوتوناً من ضوء مرئي، فإنه يمكنها أن تقوم بانتقال إشعاعي يُزيح إلكتروناً من مستوى تكافؤ إلى مستوى توصيل إلى أن تُحرر في نهاية الأمر ذرة فضة واحدة من جزيء هاليد الفضة. بعد أن تتحرر عدة ذرات فضة مجاورة بواسطة الضوء، يمكنها أن تكوّن جسيما صغيراً من معدن الفضة. وعند تحميض الفيلم، فإن جسيم الفضة هذا يحوّل بلورة هاليد الفضة بأكملها إلى فضة معدنية. إن التركيب المجهري الخشن لتلك الفضة يجعلها تبدو سوداء بدلا من لامعة.

في التصوير الأبيض والأسود، تكوّن جسيمات الفضة ذاتها صورة سلبية على الفيلم المحمّض. فأينما اصطدم ضوء بالفيلم، فإنه يكتسب نمطاً كثيفاً أسود من جسيمات الفضة، وأينما اختفى الضوء، يُصبح الفيلم جلياً بمجرد أن تُغسل أملاح الفضة غير المعرضة. على الرغم من أن الصورة على الفيلم المحمّض ذاته سلبية – أي المضيء مظلم والمظلم مضيء – إلا أن عملية إعداد طباعة الصور الفوتوغرافية تعكس المضيء والمظلم مرة ثانية بحيث تكون الصورة على ورق الطباعة موجبة.

في التصوير الفوتوغرافي الملوّن، تتعرّض بلورات فضة الهاليد للضوء من خلال مرشحات ومتحسسات ألوان، بحيث يسجّل الفيلم بشكل منفصل تعرضه للألوان الأولية الثلاثة للضوء (انظر قسم ١٤-٢). وأثناء التحميض، يتم غسل الفضة ذاتها، لكن تظل صورة ملونة سالبة على الفيلم. على سبيل المثال، أينما سقط ضوء أزرق على الفيلم، فإنه يكتسب مسحة صفراء وبالتالي يمتص ضوءاً أزرق. مرة أخرى، عملية الطباعة الفوتوغرافية تعكس الألوان مرة ثانية بحيث تكون في الطباعة صوراً موجبة.

تكتشف مستشعرات الصور الإلكترونية الضوء عن طريق الفوتودايود (الدايودات الضوئية) - دايودات محسّنة لكي تكتشف الضوء. إن الفوتودايود هو تقريبا عكس الدايود الباعث للضوء (قسم ١٤-٣). تذكّر أن الدايود الباعث للضوء يبعث ضوءاً عندما تعبر إلكترونات مستوى التوصيل من المهبط إلى المصعد وتخضع لانتقالات إشعاعية إلى مستويات

التكافؤ. يستخدم الدايود الباعث للضوء تيارا كهربائيا لإنتاج ضوء. بالمقابل، يمتص الفوتودايود الضوء عندما تخضع إلكترونات مستوى التكافؤ لانتقالات إشعاعية إلى مستويات التوصيل وتعبر من المصعد إلى المهبط . يستخدم الفوتودايود الضوء لكي يُنتج تيارا كهربائيا.

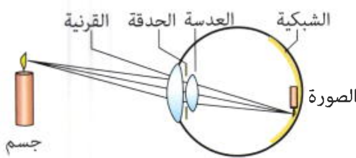
يستخدم مستشعر الصور الإلكتروني مصفوفة ضخمة من الفوتودايودات لتسجيل نمط الضوء في الصورة الحقيقية. فعندما يتعرض كل فوتودايود إلى الضوء فإنه يجمّع إلكترونات على مهبطه ومن ثم تقيس الكاميرا الشحنة المتجمّعة على كل من الفوتودايودات. وللحصول على معلومات عن الألوان، تُغطّى فوتودايودات مستشعر الصور بنمط من مرشحات حمراء وخضراء وزرقاء بحيث يقيس كل فوتودايود شدة لون ضوئي أولي واحد فقط.

تحقق من فهمك # ٦: الصور الضبابية (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

كثيراً ما تستخدم أجهزة الكشف في المطارات أشعة إكس للبحث عن الأشياء المخفية. يمكن لهذه الفوتونات ذات الطاقة العالية أن تتلف الفيلم. كيف؟

العيون والنظارات

لا تشتمل جميع الكاميرات على تقنية حديثة. معظم الأشخاص مولودون باثنتين منهم: عيناهم . مثل الكاميرا التي ناقشناها أعلاه، تحتوي كل عين في الأساس على عدسة مجمّعة ومستشعر صور (شكل ١٣،١،١٥). في هذه الحالة، العدسة هي مجموعة من السطح الأمامي لمقلة العين(القرنية)، والعدسة الداخلية والتي هي تحت القرنية مباشرة. مستشعر الصور هو الشبكية، وهي نمط متسع من الخلايا الحسّاسة للضوء والأعصاب موجود في ظهر مقلة العين.



شكل ١٣،١،١٥: العين هي كاميرا، بحيث تقوم قرنيتها وعدستها بتكوين صورة حقيقية على الشبكية. تقوم العين بالتركيز بتغيير تقوّس عدستها. تُغيّر الحدقة عدد f للعين.

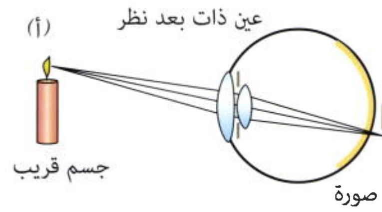
عندما تنظر إلى المنظر الذي أمامك، فإن القرنية والعدسة في عينك تُسقط صورة حقيقية لذلك المنظر على شبكيتك وتُبلغ شبكيتك دماغك عن النمط الضوئي الناتج، وكالمعتاد، تكون الصورة الحقيقية مقلوبة ومعكوسة يسارا إلى يمينا، لكن دماغك يعوض عن ذلك التأثير.

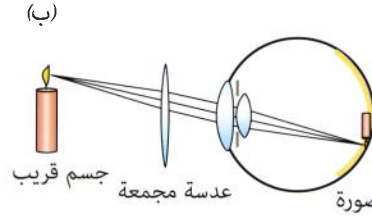
بما أن مقلة عينك لا يمكنها أن تغيّر المسافة بين العدسة ومستشعر الصور، فإنها تركّز الصورة الحقيقية بتعديل البُعد البؤري للعدسة. عندما تنظر للأجسام القريبة، تصبح العدسة في عينك أكثر تقوّسا ويتناقص بُعدها البؤري. وبالتالي تتجمّع الأشعة الضوئية من ذلك الجسم القريب بشكل أكثر وضوحا وتكوّن صورة حقيقية على شبكيتك، وعندما تنظر لجسم أكثر بُعدا، تُصبح العدسة أقل تقوّسا ويزيد بُعدها البؤري.

مثل الكاميرا المعقدة، لعينك حدقة داخل نظام عدستها. فعندما تنظر لمنظر ساطع، تتقلّص تلك الحدقية لتحُدّ من كمية الضوء الساقط على شبكيتك، وكتأثير جانبي، يزيد عمق تركيزك ويظهر كل شيء أوضح. من الأسهل التركيز عند القراءة أو العمل في بيئة جيّدة الإضاءة.

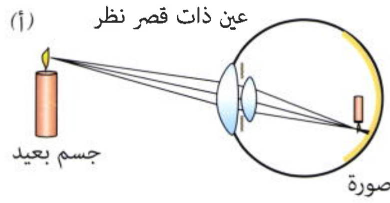
لكن ليست كل الأعين جيّدة والعديد يحتاج مساعدة لتكوين صور حقيقية واضحة على شبكيتها. على الرغم من أن التقنيات الجراحية الحديثة باستخدام الليزر يمكنها أن تُعيد تشكيل القرنيات لتحسين وضوح الصورة، إلا أن الطريقة التقليدية لتحسين الرؤية هي ارتداء نظارات أو عدسات لاصقة. إلى الآن يحتوي نظام عدسة العين على مكونين، القرنية والعدسة، فإضافة مكوّن ثالث (النظارات) ليس بالمعضلة الكبيرة.

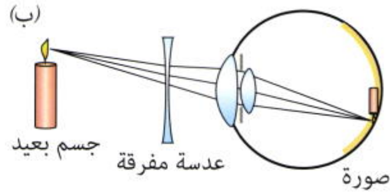
إن الإنسان الذي يعاني من بُعد النظر لا يمكنه أن يرى الأجسام القريبة بوضوح لأن نظام عدسته له بُعد بؤري طويل جدا (شكل ١٤،١،١٥ أ). ففي حين يستطيع أن يُسقط صوراً حقيقية للأجسام البعيدة على شبكيته، إلا





شــكل ١٤،١،١٥: (أ) العــين التي تعــاني من بُعد النظــر تعطــف الضوء بشــكل ضعيــف بحيث لا تســتطيع أن تركّز على جســم قريــب. تتكوّن الصــورة الحقيقيــة خلف الشــبكية. (ب) تزيح العدســة المجمّعة الصــورة الحقيقيــة إلى الأمام بحيث تتركّز على الشبكية.





شــكل ١٥،١،١٥: (أ) العين التــي تعاني من قصر النظــر تعطــف الضوء بشــكل قــوّي بحيث لا تستطيع أن تركز على جسم بعيد. تتكوّن الصورة الحقيقيــة أمام الشــبكية. (ب) تزيح العدســة المفرّقة الصورة الحقيقية إلى الخلف بحيث تتركّز على الشبكية.

أن الأجسام القريبة تتركّز بعيدا جدا عن مقدمة عينه ويسقط الضوء على شبكيته قبل أن يكوّن صورة حقيقية. للتعويض عن بُعد النظر، يرتدي الإنسان نظارات ذات عدسات مجمّعة (شكل ١٤،١،١٥ ب). تبدأ هذه العدسات بمهمة عطف أشعة الضوء سوية حتى من قبل أن تدخل عينيه. يُكمل نظام عدسته الانعطاف وتتكوّن الصور الحقيقية أقرب إلى مقدمة عينيه، وبالتالي يصبح قادراً على رؤية الأجسام البعيدة بوضوح.

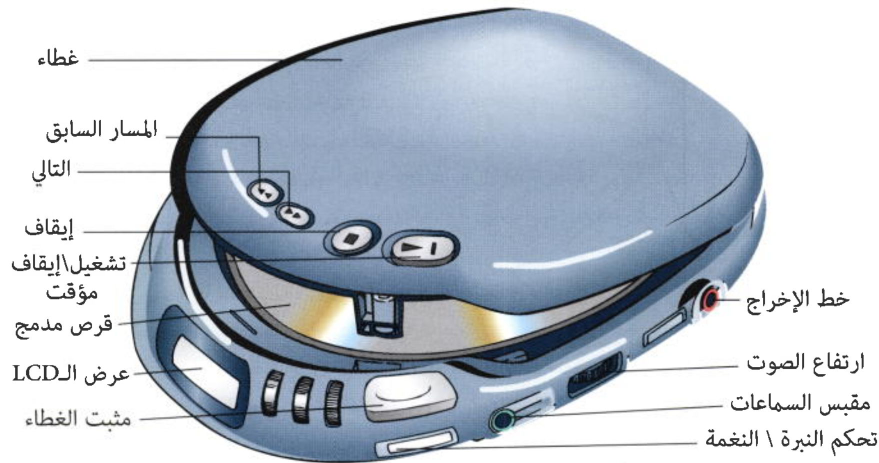
بالمقابل،فإن الإنسان الذي يُعاني من قصر النظر غير قادر على تركيز الأجسام البعيدة لأن نظام عدسته له بُعد بؤري قصير (شكل ١٥،١،١٥ أ). تتكوّن الصور الحقيقية لتلك الأجسام البعيدة على مسافة قصيرة جدا من مقدمة العين ويكون الضوء قد بدأ بالانتشار متباعدا عند وصوله للشبكية.

للتعويض عن قُصر النظر، يرتدي الإنسان عدسات مفرّقة (شكل ١٥،١،١٥ ب). العدسة المفرقة هي عدسة تعطف أشعة الضوء بعيدا عن بعضها وبالتالي لها بُعد بؤري سالب. في الغالب تكون العدسة المفرّقة أقل سمكا في وسطها مقارنة بأطرافها، وتقوم بعطف الأشعة الضوئية المتوازية تقريبا القادمة من جسم بعيد بحيث تتفرق بشكل أسرع. عندها تبدو هذه الأشعة وكأنها قادمة من جسم أكثر قربا، بينما هي في الحقيقة صورة خيالية قريبة، فتُصبح عينا الإنسان قادرة على تركيزها على الشبكية بشكل صحيح.

تحقق من فهمك # ٧: المحافظة على صورتك

(للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

يمكن لنظارات الشخص الذي يُعاني من بعد النظر أن تُسقط صورة حقيقية لمنظر بعيد على جدار أبيض. لكن نظارات شخص يُعاني من قصر النظر لا تُنتج أي صورة حقيقية. لمَ لا؟



٢-١٥ التسجيل والاتصالات الضوئية

إن استخدام الضوء لنقل المعلومات عمل قديم جدا بِقدم استخدام إشارات من النار وطبيعي بطبيعة الرؤية ذاتها. لكن التقدم في المصادر الضوئية، والمواد البصرية، والإلكترونيات زاد بشكل جوهري إمكانيات أنظمة المعلومات البصرية. إن البصريات والمعلومات يسيران سويًا بشكل جيّد بحيث أنهما مسؤولان جزئيا عن ثورة المعلومات الحالية.وفظهور مشغلات الأقراص المدمجة في بداية الثمانينيات الميلادية حوّل صناعة الموسيقى بين يوم وليلة تقريباً، والألياف البصرية تشبك عالمنا سوية بسرعة هائلة. في هذا القسم، سوف ننظر في كيفية استخدام الأجهزة البصرية للضوء لمعالجة المعلومات.

أسئلة للتفكير

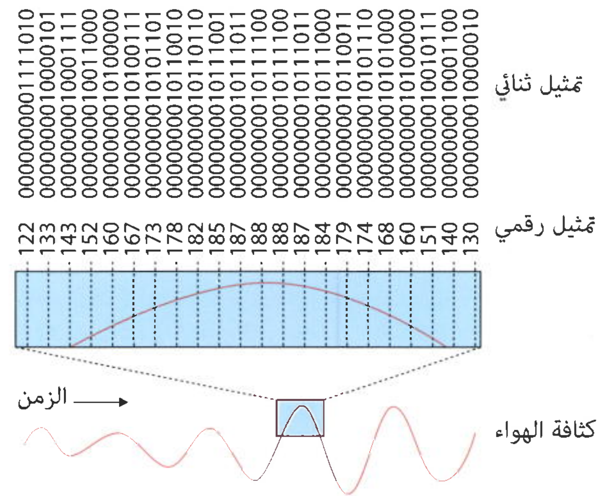
لماذا تكون الأقراص المدمجة وأقراص الفيديو الرقمية ملوّنة؟ أين تُخزّن المعلومات التي بها؟ كيف يمكن للقرص المدمج وقرص الفيديو الرقمي الـ أن تتجاهل بصمات الأصابع، والغبار، وملوثات الأسطح الأخرى أثناء التشغيل؟ لماذا يتضمن تسجيل وتشغيل القرص المدمج أوقرص الفيديو الرقمي استخدام الليزر؟ ما الذي يحُد من الفترة الزمنية لصوت القرص المدمج أو القرص الفيديو الرقمي ؟ لماذا تكون الأقراص المدمجة و أقراص الفيديو الرقمية ـ خالية من الضوضاء؟ كيف يمكن لليف زجاجي أن يوجّه الضوء في مسار مقوّس؟ كيف يمكن للضوء أن يسير خلال كيلومترات من الليف الزجاجي دون أن يخفت؟

تجارب يمكن القيام بها

امسك بقرص مدمج أو قرص فيديو رقمي مسجّل عليه معلومات من حوافه وانظر لسطحه غير المكتوب عليه. تحت الوجه البلاستيكي الشفّاف طبقة ناعمة ولامعة تعكس ألوان قوس المطر. تتسبب ندب صغيرة جدا في هذه الطبقة في هذا التلوين، وتكوّن هذه الندب مساراً حلزونياً حول مركز القرص، والأقواس المتجاورة من هذا المسار قريبة جدا من بعضها بحيث تتداخل الموجات الضوئية المنعكسة منها، كما في غشاء الصابون.إن الطبقة العاكسة رقيقة جدا إلى درجة أنه يمكنك الرؤية من خلالها إذا أمسكت بها أمام ضوء ساطع. هل يمكنك رؤية انعكاسات جسيمات الغبار الموجودة على السطح غير المكتوب عليه؟ على أي عمق أسفل السطح البلاستيكي تقع الطبقة اللامعة؟

التسجيل الرقمي

على الرغم من أن التقنيات التناظرية هيمنت على التسجيل الصوتي قرابة القرن، إلا أنه تم استبدالها بتقنيات رقمية في أقل من جيل، وقد كان ذلك في الغالب أمراً متعلّقاً بجودة الصوت. التسجيل التناظري هو التسجيل الذي تُمثّل فيه كمية فيزيائية مستمرة التذبذب في الكثافة، أي الصوت في الهواء. لذا فإن التسجيل التناظري أكثر تعرضا للضوضاء، والتلف، وعدد لانهائي من



شكل ١,٢,١٥: يمكن تمثيل الصوت كسلسلة من الأرقام. كل رقم يقابل كثافة الهواء عند لحظة زمنية معيّنة.

العيوب. ببساطة لا يمكن لأسطوانات الفونوغراف وتسجيلات الأشرطة التناظرية أن توفّر صوتا مثاليا.

في المقابل، يمكن أن تقترب التسجيلات الرقمية من الكمال، وذلك بتمثيل الصوت على شكل رقمي، أي باستخدام العديد من الكميات الفيزيائية بقيم متفردة لتمثيل قياسات الكثافة عدديا، فيمكن للتسجيل الرقمي أن يوفّر معلومات صوتية صحيحة خالية من الضوضاء والتلف. فطالما قيست تذبذبات الكثافة بدقة، فإنه يمكن للتسجيل الرقمي أن يعيد تكوينها بدقة متناهية.

مثل المشغلات الصوتية التي درسناها في القسم ١٢-٢، فإن الأقراص المدمجة و أقراص الفيديو الرقمية ـ الصوتية تُمثّل انضغاطات وتخلخلات الهواء المسببة للصوت على هيئة أرقام (شكل ١,٢,١٥). وهذه الأرقام هي جوهرياً قياسات كثافة الهواء والتي تُقرأ مرة بعد أخرى أثناء عملية التسجيل، ويستخدمها المشغّل لإعادة إنتاج الصوت المسجّل.
في التصميم الاصطلاحي للأقراص المدمجة ، يتم أخذ قياسات الكثافة 44,100 مرة كل ثانية لقناتين صوتيتين منفصلتين وتسجّل هذه القياسات على القرص على هيئة النظام الثنائي، باستخدام 16 بت لكل قياس. وبما أن كثافة الهواء يمكنها أن تنخفض وترتفع، فإن هذه البت تُمثّل الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة من 32,768- إلى 32,767، والتي بدورها تمثّل مقدار كثافة الهواء فوق أو تحت الكثافة المتوسطة. قياسات الكثافة بدقة 16 بت كافية لإعادة إنتاج كلٍّ من الموسيقى الصاخبة والهادئة بدقة متناهية.
يُسجّل قرص الفيديو الرقمي المعلومات بالطريقة الرقمية مثل القرص المدمج. ولكن تقنية قرص الفيديو الرقمي أحدث وبالتالي أكثر تعقيدا. يمكن لقرص الفيديو الرقمي الصوتي أن يختار من بين العديد من معدلات القياس، وعدد البت لكل قياس، وعدد القنوات. قد يكون لقرص الفيديو الرقمي الاعتيادي خمس قنوات صوتية: يسار - أمام، ومنتصف - أمام، ويمين - أمام، ويسار - خلف، ويمين - خلف. يمكن أن يكون للثلاث قنوات الأمامية 96,000 قياس للكثافة كل ثانية بـ 24 بت لكل قياس، ويمكن أن يكون للقناتين الخلفيتين 48,000 قياس كل ثانية بـ 20 بت لكل قياس. في حين تتضمن جميع هذه القياسات والبتات والقنوات معلومات أكثر مما هو مختزن على القرص المدمج ، فإن قرص الفيديو الرقمي يضغط تلك المعلومات قبل تخزينها. على النقيض من ذلك، تكون معلومات القرص المدمج غير مضغوطة.

في أي من الحالتين، لا تُسجّل قياسات كثافة الهواء ببساطة واحداً تلو الآخر على سطح القرص. بدلا من ذلك، يُعاد ترتيب هذه الأرقام بشكل واسع قبل تخزينها، وتسمح إعادة الترتيب هذه للمشغّل بأن يعيد إنتاج الصوت بدقة حتى وإن لم يمكن قراءة القرص بالكامل. كما سنرى قريبا، قراءة هذه الأقراص عمل تقني بارع ومعرّض لإخفاقات متعددة. للتأكد من أن الصوت (والفيديو) يمكن إعادة تكوينه بالكامل وبدون مقاطعة، فإن الأعداد تُسجّل بطريقة مشفرة. تبدو هذه الأرقام مكررة بحيث حتى وإن كانت نسخة واحدة من العدد غير صحيحة، فمازال هناك معلومات صحيحة كافية على طول نفس التقوّس في مسار القرص الحلزوني لإعادة تكوين هذا الرقم بالكامل. تقلل هذه النسخ المطابقة للمعلومات الأصلية من زمن تشغيل كل من الأقراص المدمجة وأقراص الفيديو الرقمية ـ لكنها أساسية للدقة.

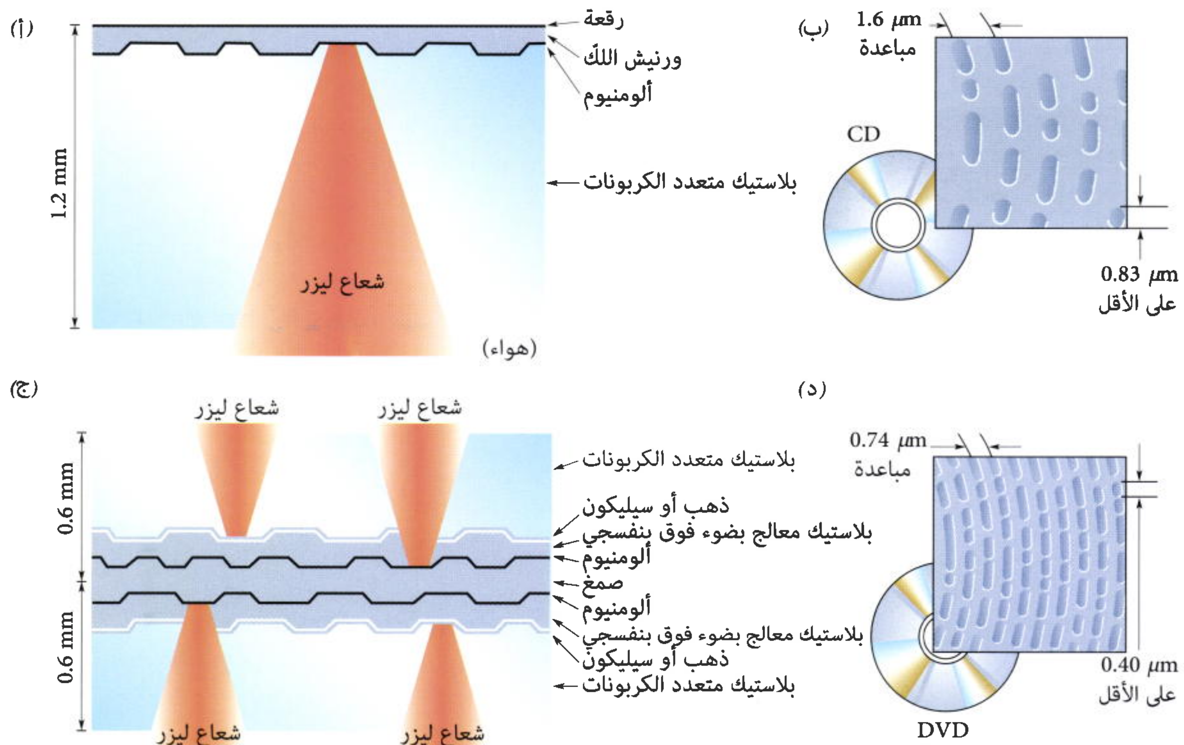
طريقة التشفير تترك القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي تقريبا محصّناً بالكامل من مشاكل التشغيل باستثناء المشاكل العسيرة جدا. فمن حيث المبدأ، يمكنك أن تُتلف أو تُعتم شِقّة على القرص عرضها 2mm، من مركزها إلى حافتها، ولن يزال المشغّل قادرا على إعادة إنتاج الصوت (والفيديو) بدقة. لكن التلف على طول القوس في المسار الحلزوني هو أكثر خطورة على المعلومات. إذا لم يتمكن المشغّل من قراءة مسافة طويلة من قوس واحد، فإنه لن يكون قادرا على استرجاع المعلومات، ولهذا يجب عليك دائما أن تنظّف القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي من مركزه خروجا نـحو حافته.

تحقق من فهمك # ١: الوضوح اللاسلكي خارج المنزل (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

تنقل بعض الهواتف الجوّالة صوتك على هيئة رقمية. بصفة عامة، كيف يتم هذا النقل الرقمي؟

تركيب القرص المدمج و أقراص الفيديو الرقمية

قطر الـقرص المدمج وقرص الفيديو الرقمي الاعتيادي هو 120mm (4.72in) وسمكه 1.2mm (0.05in). أحد وجهي الـقرص المدمج شفّاف وأملس لكن الوجه الآخر يحتوي على عدة طبقات بعضها فوق بعض: غشاء رقيق من الألومنيوم، وطلاء حماية، ومُلصق مطبوع (شكل ٢,٢,١٥ أ). في المقابل، يكون قرص الفيديو الرقمي مُغطّى بقرصين بلاستيكين شفافين سمك كل منهما 0.6 mm، مع وجود طبقة أو طبقتين أو أربع طبقات عاكسة من الألومنيوم أو الذهب أو السيلكون مرصوصة فوق بعضها البعض بينهما (شكل ٢,٢,١٥ ج)، وكلما زاد عدد الطبقات في قرص الفيديو الرقمي زادت المعلومات التي يحملها.



شـكل ٢,٢,١٥: (أ) يحتوي القرص المدمج على طبقة رقيقة من الألومنيوم على أحد جانبي قرص بلاسـتيكي شفّاف. (ب) لطبقة الألومنيوم ندب صغيرة جدا يتم اكتشـافها بواسـطة شعاع ليزر طوله الموجي 780nm. (ج) يحتوي قرص الفيديو الرقمي على عدة طبقات تصل إلى الأربعة من الألومنيوم أو الذهب أو السـيلكون مرصوصة فوق بعضها بين قرصين بلاسـتيكيين شـفافين. طبقات الذهب أو السيلكون شبه عاكسة. (د) يتم الكشـف عن الندب في هذه الطبقات بواسـطة شـعاع ليزر طوله الموجي 650nm. يمكن أن يتركّز الشعاع إما على الطبقة شبه العاكسة أو على طبقة الألومنيوم التي تليها مرورا من خلال تلك الطبقة.

إن الطبقات العاكسة هي أسطح التسجيل، وهذه الطبقات رقيقة جدا بحيث تمرر فعليا كمية بسيطة من الضوء خلالها. في طبقات أقراص الفيديو الرقمية المصنوعة من الذهب أو السيلكون، يُعدّ شبه الشفافية أساسياً لأنه يسمح للنظام البصري الذي يقرأ المعلومات أن يُرسل ضوءاً خلال الطبقة شبه الشفّافة إلى طبقة الألومنيوم التي تليها، ولكن حتّى طبقات الألومنيوم تمرر بعض الضوء. في حين تتسارع إلكترونات الألومنيوم استجابة للمجال الكهربائي للضوء وفي العادة تعكس ذلك الضوء بالكامل، إلا أنه لا توجد إلكترونات كافية في هذه الطبقات - والتي يبلغ سمكها من 50 إلى 100 نانومتر- للقيام بهذه المهمة فيمر بعض الضوء من خلالها.

إن الطبقات العاكسة ليست ملساء تماماً، بل كل طبقة لها مسار حلزوني ضيّق مُشكّل على سطحها (شكل ٢,٢,١٥ ب،د)، وهذا المسار هو سلسلة من الندب المجهرية الصغيرة إلى درجة أن طولها 0.83µm على القرص المدمج أو 0.40µm على قرص الفيديو الرقمي . تبعد التقوسات المتجاورة في المسار الحلزوني 1.6µm فقط عن بعضها في القرص المدمج و0.74 µm فقط في قرص الفيديو الرقمي . يُمثّل طول الندب والمنطقة المستوية التي تفصل بينها أعداداً، ويفحص المشغّل هذه الندب وتلك المناطق حينما يدور القرص ويحوّل أطوالها إلى أعداد، وصوت، وفيديو.

إن أطوال الندب والفراغات التي تفصل بينهما لم يتم اختيارها عشوائيا. فبما أن الموجات الكهرومغنطيسية غير قادرة على الكشف عن تراكيب أقل بكثير من أطوالها الموجية (انظر قسم ١٣-٢)، فإن الطول الموجي لشعاع الليزر يحُدّ أدق تفصيل على القرص. ففي مشغّل القرص المدمج ، يكون الطول الموجي للشعاع 780nm في الهواء و 503nm في بلاستيك متعدد الكربونات (polycarbonate) – وهو قصير بما يكفي للكشف عن ندب القرص المدمج بسهولة. وفي مشغّل قرص الفيديو الرقمي ، يكون الطول الموجي لشعاع الليزر بين 635nm و650nm في الهواء وبين 410nm و 420nm في البلاستيك – وهو قصير بما يكفي للكشف عن الندب في قرص الفيديو الرقمي . يحدث تقلّص الطول الموجي داخل القرص لأن البلاستيك متعدّد الكربونات (polycarbonate) له معامل انكسار قيمته 1.55، بمعنى أن سرعة الضوء في ذلك البلاستيك تنخفض عن قيمتها في الفراغ بمعامل 1.55، فيتقلّص طوله الموجي بنفس المعامل.

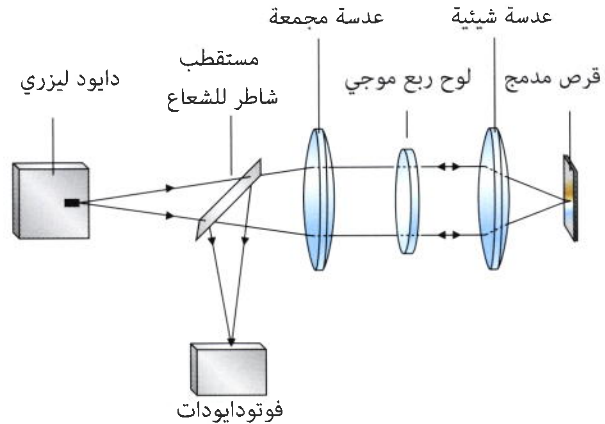
يكتشف المشغّل ندبة بارتداد الضوء من على القرص وتحديد مقدار الضوء الذي ينعكس. فبينما يمر شعاع الليزر المركّز من فوق ندبة، يُصبح الانعكاس خافتا بسبب أن الندبة المقوّسة تُبعثر الضوء في جميع الاتجاهات وبسبب تأثيرات التداخل. إن الضوء المنعكس من على الندبة يسير لمسافة أبعد من الضوء المنعكس من المنطقة المستوية حولها، فتنزاح المجالات الكهربائية والمغنطيسية في الموجتين بالنسبة لبعضهما البعض. لقد تم اختيار عمق الندبة حتى تكون الموجتان المنعكستان مختلفتين في الطور تقريباً فيتداخلان تداخلا هدّاما. إجمالا، تكتشف مستشعرات الضوء في المشغّل ضوءا قليلا نسبيا عندما يقع شعاع الليزر فوق ندبة.

يستخدم مشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي دايوداً ليزرياً لإنتاج ضوئه. تم تبنّي الطول الموجي القياسي 780 nm في مشغلات الأقراص المدمجة في عام ١٩٨٠م، عندما كان الدايود الليزري ذو الطول الموجي 780 nm تحت الأحمر يمكن الاعتماد عليه على الرغم من غلائه نسبيا. لقد تقدمت التقنية منذ ذاك الزمن، ويعكس الطول الموجي القياسي 635 nm إلى 650nm لمشغلات أقراص الفيديو الرقمية تطوّر الدايودات الليزرية الحمراء الرخيصة. إن المقاييس الحديثة تتبع التقنية، لذا، بدأت أنظمة التسجيل البصري التي تستند على دايودات ليزرية زرقاء وبنفسجية وفوق بنفسجية بالظهور.

تحقق من فهمك # ٢: الضوء الأزرق المتميّز

(للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

عندما تبدأ مشغلات الأقراص باستخدام ليزرات زرقاء، فإنه سيتطلب إعادة تصميم الأقراص البصرية. إذا كان لضوء الليزر الجديد طول موجي مقداره 400nm في الهواء أو الفراغ، كيف يجب أن يغيّر المصممون عمق الندب في الطبقة العاكسة؟



شكل ٣,٢,١٥: في النظام البصري لمشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي ، يمر ضوء من دايود ليزري خلال مستقطب شاطر للشعاع، وعدسة مجمّعة، ولوح ربع موجي، وعدسة شيئية قبل التركيز على الطبقة العاكسة داخل القرص. يلتف الضوء المنعكس 90° عند المستقطب الشاطر للشعاع ويتركز على مصفوفة من الفوتودايودات.

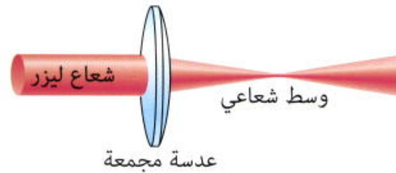
النظام البصري لمشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي

يقيس النظام البصري لمشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي أطوال الندب الصغيرة جدا بينما تتحرك على قرص دائر، وتتطلب عملية القراءة هذه دقة عالية. ليس على المشغّل أن يركّز بقعة ضوء ليزره تماما على الطبقة العاكسة فحسب، بل يجب عليه أيضا أن يتبع المسار الحلزوني بينما يمر. إن القرص ذاته ليس مستويا تماما ولا دائرياً تماما، فيجب على المشغّل أن يُعدّل وحدة قراءته بشكل مستمر أثناء التشغيل.

يجب أن يُبقي النظام البصري شعاع ليزره متركّزا على الطبقة العاكسة (التركيز التلقائي) ويجب أن يتبع المسار بينما يمر (التتبّع التلقائي). هاتان العمليتان التلقائيتان هما مثالان جميلان لاستخدام الاستجابة.
التركيب الأساسي لمشغّل القرص المدمج أوأقراص الفيديو الرقمية- الاعتيادي موضّح في الشكل (٣,٢,١٥). يمر الضوء من الدايود الليزري خلال عدة عناصر بصرية في طريقه للطبقة العاكسة في القرص. يتركّز الضوء بإحكام على تلك الطبقة، حيث يُضيء مساراً وحيداً فقط. ينعكس بعض الضوء من على الطبقة ويعود خلال العناصر البصرية. أخيرا، يلتف الضوء المنعكس 90° عند مرآة خاصة تُسمّى مستقطب شاطر للشعاع ويتركّز على مصفوفة من مستكشفات الضوء. يقيس المشغّل التيارات الكهربائية المتدفقة خلال المستكشف وتستخدم تلك القياسات لكل من الحصول على معلومات من القرص والتحكّم في أنظمة التركيز والتتبّع.

لنفحص هذا النظام البصري عنصرا عنصرا. بعد مغادرة الدايود الليزري، يمر الضوء خلال مستقطب شاطر للشعاع. يُحلّل هذا الجهاز استقطاب الضوء. كما رأينا في قسم ١٤-١، تنعكس الاستقطابات المختلفة للضوء بشكل مختلف عندما تسقط على سطح شفّاف بزاوية. في هذه الحالة، يمر الضوء المستقطب من الليزر خلال السطح المائل بزاوية 45°، لكن ينعكس الضوء ذو الاستقطاب الآخر. يُغطّى شاطر الشعاع بغطاء خاص لكي يتم فصل الاستقطابين بشكل تام.

ينفرج الضوء من الدايود الليزري بسرعة حينما يمر خلال شاطر الشعاع. هذا لا يعني أن الدايود الليزري لا يعمل أو أنه مصمم بشكل رديء؛ بل يعني أن الموجة الضوئية النافذة من فتحة صغيرة تنتشر بشكل طبيعي للخارج، مثل الموجات على سطح البحيرة. يُعرف هذا الانتشار بالحيود ويحدث كلما انقطعت موجة ضوئية عند المرور خلال فتحة. فكلما صغرت الفتحة، زاد الانتشار. وبما أن السطح الباعث في الدايود الليزري هو في الأساس فتحة صغيرة جدا، فإن شعاع الليزر ينفرج بسرعة بينما يتجه بعيدا عن الدايود. يستخدم المشغّل عدسة مجمّعة تقع بعد شاطر الشعاع لإيقاف هذا الانتشار، وعند تلك النقطة، يكون الشعاع الضوئي عريضا بما يكفي بحيث يسبب الحيود الناتج من مرور الضوء خلال فتحة العدسة انتشاراً إضافياً صغيراً. يغادر الشعاع العدسة متوازيا، بمعنى أنه يُحافظ على قطر ثابت تقريبا بعد المرور بالعدسة.



شكل ٤,٢,١٥: عندما تركّز عدســة مجمّعة شعاع ليزر، فإن الضوء لا يلتقي عند نقطة وحيدة في الفراغ. بدلا من ذلك، يصل الضوء لوسط ضيّق قطره يساوي طول موجي واحداً من ذلك الضوء تقريباً.

يمر ضوء الليزر بعدها خلال لوح ربع موجي، ويقوم هذا الجهاز المدهش بنصف مهمة تحويل الضوء المستقطب أفقيا إلى ضوء مستقطب رأسيا أو العكس بالعكس. يقال للأضواء المستقطبة أفقيا ورأسيا أنها مستقطبة استوائيا لأن مجالاتها الكهربائية تتذبذب دائما ذهابا وإيابا في مستوى واحد بينما تتحرك خلال الفراغ. لكن اللوح الربع موجي يحوّل الضوء المستقطب استوائيا إلى ضوء مستقطب دائريا. لقد تعرضنا للاستقطاب الدائري من قبل عند الحديث عن انتقال موجات الراديو من محطات إذاعة FM. في الضوء المستقطب دائريا، يدور المجال الكهربائي فعليا حول الاتجاه الذي يسير فيه الضوء.

والآن يمر الضوء خلال عدسة شيئية تركّزه على الطبقة العاكسة للقرص. في طريقه للطبقة العاكسة، يدخل الضوء للسطح البلاستيكي في القرص. عند نقطة دخوله، مازال قطر الشعاع أكثر من 0.5mm، والذي يُفسّر لماذا لا يسبب الغبار أو بصمات الأصابع على سطح القرص أي مشاكل. ففي حين أنه قد يحجب التلوث بعض ضوء الليزر، إلا أن معظمه يستمر إلى الأمام إلى الطبقة العاكسة.

يصل الضوء لتركيز محكم بمجرد وصوله عند الطبقة العاكسة. فبالرغم من أنه قد يبدو أن جميع الضوء يجب أن يتجمّع سوية في نقطة واحدة على ذلك السطح، إلا أنه في الواقع يكوّن بقعة قطرها طول موجي واحد تقريبا. يحّد حجمَ هذه البقعة الطبيعةُ الموجية للضوء. بغض النظر عن مدى محاولاتك لتركيز الضوء، لا يمكنك أن تكوّن بقعة أصغر من الطول الموجي للضوء. بدلا من ذلك، يكوّن الشعاع جزءاً وسطياً ضيّقاً ثم ينفرج (شكل ٤,٢,١٥). إن قطر وسط الشعاع حوالي طول موجي واحد لهذا الضوء وطوله بضعة أطوال موجية، حسب عدد f للعدسة المجمّعة. وبما أن طول الوسط هو أقل من 2μm (2 مايكرون)، فإن نظام التركيز التلقائي للمشغّل يجب أن يُبقي العدسة الشيئية على البعد الصحيح من الطبقة العاكسة.

هذه المحدودية الأساسية لمقدار تركيز شعاع ضوئي وتضييقه هي مثال آخر لظاهرة الحيود؛ العدسة المركّزة تقطع الموجة الضوئية وتُحدث انفراجاً حتمياً. لكن حتى الوصول لهذا الحدّ المثالي للتركيز يتطلب تصميما وتصنيعاً دقيقاً للعناصر البصرية. ففي حين لا تصل معظم الأنظمة البصرية الأخرى لحدّها المثالي، إلا أن النظام البصري لمشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي يعمل بشكل جيّد في ظل قيود الحيود ذاتها. إن بصريات المشغّل مثالية ويقال عنها أنها محدودة الحيود.

يعتمد مقدار الضوء المنعكس من الطبقة على اصطدام بقعة الليزر بندبة أو عدم اصطدامها، ويتبع هذا الضوء المنعكس المسار البصري عكسيا. يتم جعل الضوء المنعكس متوازيا بواسطة العدسة الشيئية ثم يمر خلال اللوح الربع موجي مرة أخرى. الآن ينهي اللوح المهمة التي ابتدأها سابقا؛ ويصبح الضوء في النهاية مستقطباً استوائيا، لكن باستقطاب معاكس عن ما كان عليه عندما غادر الليزر. إن الضوء المستقطب أفقيا أصبح الآن مستقطباً رأسيا والعكس بالعكس.
بعد ذلك يمر الضوء المنعكس خلال العدسة المجمّعة، والتي تقوم بتجميع الضوء، ثم يسقط على المستقطب الشاطر للشعاع. وبما أن استقطاب الضوء تغيّر، فإن الشعاع الشاطر لا يسمح للشعاع بالمرور مباشرة خلاله، وبدلا من ذلك، يدير هذا الشعاع المنعكس 90° ويوجهه نـحو مصفوفة المستكشف. هذا النظام الذكي لإعادة التوجيه هو مهم لسببين. أولا: يحافظ على ضوء الليزر بالسماح لمعظمه بالسير من الدايود الليزري إلى المستكشف. ثانيا: يمنع الضوء المنعكس من العودة للدايود الليزري، حيث سيتم تضخيم ذلك الضوء ويتسبب في عدم عمل الدايود الليزري بشكل جيّد.

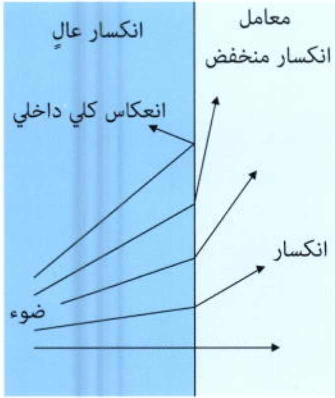
يتركز الضوء على مصفوفة من الفوتودايودات، وتسمح هذه المصفوفة للمشغّل بأن يكتشف الندب عن طريق شدة الضوء المنعكس وأيضا يحدد ما إذا كانت العدسة الشيئية موضوعة بوضعية صحيحة بالنسبة لتلك الندب. للنظرة العمومية، أُلغيت من الشكل (٣,٢,١٥) العناصر البصرية المتضمنة في التركيز التلقائي والتتبع التلقائي. ولكن، بسبب هذه العناصر، يشير النمط الضوئي الساقط على مصفوفة المستكشف لأي اتجاه يجب أن تتحرك العدسة الشيئية، إن تطلب الأمر. تلك العدسة مرتبطة بملفات سلكية معلّقة بالقرب من مغنطيسات دائمة. وبتغيير التيارات المتدفقة خلال تلك الملفات، يستخدم المشغّل قوى لورنتز لتحريك عدسته الشيئية بسرعة وإبقائها في الموضع الصحيح فوق القرص.

تحقق من فهمك # ٣: لهذا يُسمى بقرص ليزري (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

لماذا يجب أن يستخدم مشغّل القرص المدمج أو قرص الفيديو الرقمي دايوداً ليزرياً بدلا من مصدر ضوئي اعتيادي مثل المصباح المتوهّج؟

الألياف البصرية

إن التشغيل الضوئي للأقراص المسجلة مسبقاً جيد للموسيقى والأفلام، ولكنها ليست ذات فائدة عندما تريد معلومات حديثة جدا. تتطلب الإنترنت والشبكة العنكبوتية روابط اتصال تعمل بسرعة البرق، ولكن حتى هنا، للبصريات والضوء دور مهم يقومان به، وأسرع طريقة لإرسال كميات هائلة من المعلومات هي استخدام الألياف البصرية.



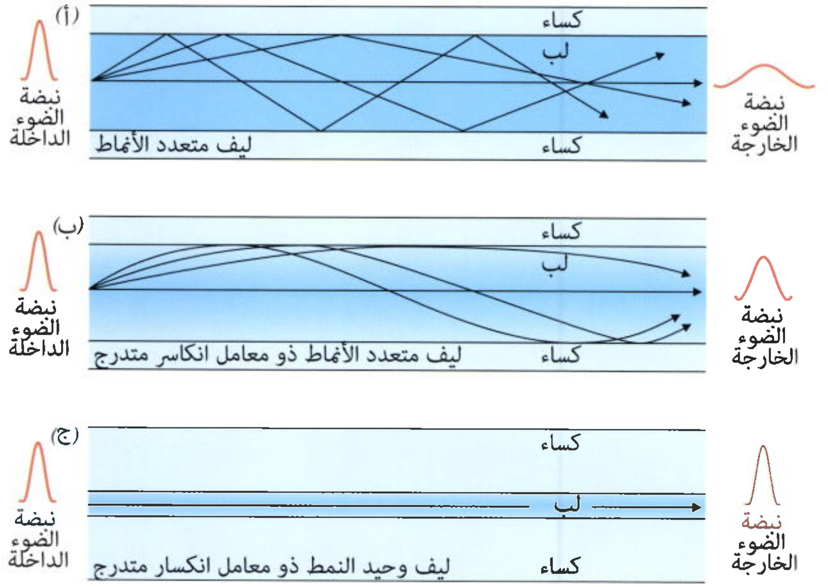
شكل ٥,٢,١٥: عندما يدخل ضوء سائر في وسط إلى وسط آخر ذي معامل انكسار أقل، فإنه ينكسر نحو الطبقة الحديّة بين تلك المادتين. إذا كانت زاوية تقاربه ضحلة جدا، فإن الضوء سينكسر بشكل كبير بحيث أنه ببساطة ينعكس من على الطبقة الحديّة. تُسمَى هذه الظاهرة بالانعكاس الكلي الداخلي.

الليف البصري هو قناة زجاجية توجه الضوء من مكان لآخر، وكل فوتون تقريباً يدخل الليف من طرف يخرج من الطرف الآخر بعد لحظات. في أبسط أشكاله، يُصنع الليف من نوعين مختلفين من الزجاج: لُب صلب من زجاج معيّن محاط بكساء من الزجاج الآخر. كلا الزجاجين شفافان بشكل رائع بحيث يمكن للضوء أن يسير خلالهما لمسافة كيلومترات بفقد قليل فقط. للمقارنة، انظر خلال حافة قطعة من زجاج النافذة المعتاد وسترى كم يبدو الزجاج مظلما. فهو يمتص كمية كبيرة من الضوء تجعله غير مناسب للاستخدام في الألياف البصرية. تُصنع الألياف البصرية من أنقى الزجاج المعروف.

إذا كان الزجاجان تقريبا شفافين تماما، فما الذي يمنع الضوء من التسرب للخارج من جوانب الليف؟ الجواب هو ظاهرة تُعرف بالانعكاس الكلي الداخلي. فبينما يحاول الضوء التحرك من اللب الزجاجي الداخلي إلى الكساء الزجاجي الخارجي، فإنه يُعكس تماماً وبالتالي لا يمكنه الهروب.

الانعكاس الكلي الداخلي هو حالة قصوى من الانكسار. عندما يواجه الضوء طبقة حديّة بين وسطين لهما معاملا انكسار مختلفان، فإن الانكسار يتسبب في انحناء الضوء (شكل ٥,٢,١٥). إذا كان للوسط الذي يدخل إليه الضوء معامل انكسار أصغر من معامل انكسار الوسط الذي يغادره، فإن الضوء ينعطف بعيدا عن خط عمودي على الطبقة الحدّية. يعتمد مقدار هذا الانعطاف على معاملي الانكسار وعلى الزاوية التي يقترب بها الضوء من الطبقة الحديّة. وطالما أن زاوية الاقتراب حادة بما فيه الكفاية، سينجح الضوء في الدخول للوسط الثاني. لكن إذا كانت زاوية الاقتراب ضحلة جدا، فإن الضوء لن يدخل الوسط الثاني إطلاقا. بدلا من ذلك، سينعكس تماماً من على الطبقة الحديّة. في الواقع، الانعكاس الكلي الداخلي له جودة أعلى في عكس الضوء من مرآة معدنية اعتيادية.

لإبقاء الضوء داخل لب الليف، يجب أن يكون معامل انكسار زجاج اللب أعلى من زجاج الكساء. بينما يتعرّض الضوء الموجود في اللب ذي المعامل الأعلى لحد الكساء ذي المعامل الأقل، فإنه يواجه انعكاساً كلياً



شكل ٦,٢,١٥: يخضع الضوء الذي يحاول مغادرة لبّ ليف بصري ذي معامل انكسار مرتفع بزاوية ضحلة لانعكاس كليّ داخلي عند الطبقة الحديّة مع الكساء ذي معامل الانكسار الأقل. (أ) في الليف المتعدد الأنماط الاعتيادي، يمكن لنبضة ضوئية أن تتبع مسارات عديدة خلال اللب وتُصبح ممتدة مع الزمن. (ب) يُظهر اللب ذو معامل الانكسار المتدرّج تمدداً زمنياً أقل لأن عملية الانعكاس أكثر تدرجا. (ج) لكن التمدد الأقل يحدث في الليف ذي النمط الواحد. يوفّر قطر اللب الصغير في هذا الليف ضوءا له نمط واحد فقط في السير بحيث يكون التمدد الوحيد الذي يحدث هو نتيجة التشتت الاعتيادي.

داخلياً ويرتد عائدا إلى اللب (شكل ٦,٢,١٥ أ). وطالما أن الليف لا ينعطف بشكل حاد، فإن الضوء يرتد ذهابا وإيابا داخل اللب ولا يمكنه الهروب. نتيجة لذلك، يقوم الضوء الداخل إلى لبّ الليف من خلال أحد طرفيه المقطوع باتباع الليف على طول الطريق إلى طرفه المقطوع الآخر.

لكن الليف ذا القطر الكبير (حوالي 50μm أو أكثر) له مشكلة. إن أشعة الضوء المرتدة خلال الليف بزوايا مختلفة بشكل طفيف تسير مسافات مختلفة أثناء مرورها خلال الليف. الضوء الذي يسير بشكل مستقيم تقريبا متبعا مركز اللب بالكاد يرتد وبالتالي يستغرق زمنا أقل لإكمال رحلته مقارنة بالضوء الذي يرتد عدة مرّات. بما أن هذا الليف العريض له مسارات ارتدادية عديدة أو «أنماط» يمكن أن يسير فيها الضوء أثناء مروره خلال الليف، فإن النبضة الضوئية القصيرة المارة خلال الليف تمتد مع الزمن (شكل ٦,٢,١٥ أ). هذا التعريض للنبضة يحُدّ بشكل كبير المعدل الذي يمكن به إرسال المعلومات خلال الليف المتعدد الأنماط.

للتقليل من مشاكل التمدد، يكون للبّ الليف البصري ذي الكفاءة الأفضل معامل انكسار متدرّج. يتم معالجة اللبّ الزجاجي بشكل خاص بحيث يتناقص معامل انكساره بسلاسة عند ابتعاده عن المركز نحو الكساء. وبدلا من الارتداد المفاجئ عند وصوله للطبقة الحدّية بين اللبّ والكساء، فإن الضوء في هذه البيئة المتدرجة لمعامل الانكسار يعود بسلاسة نحو اللبّ (شكل ٦,٢,١٥ ب). إن الفروق في المسارات بين الأنماط في الليف المتعدد الأنماط ذي المعامل المتدرّج ليست مختلفة كثيراً والنبضة الضوئية القصيرة لا تُمدّد كثيرا في الليف المتوسط الطول.

لكن في الألياف الطويلة جدا، تتراكم حتى الاختلافات الطفيفة في المسارات وتُصبح النبضات القصيرة غير واضحة في الألياف المتعددة الأنماط. ولهذا تكون القنوات البصرية ذات الكفاءة العالية هي ألياف ذات نمط وحيد، وهذه الألياف لها ألباب ضيقة جدا ذات معامل متدرّج تسمح للضوء بالسير في نمط واحد فقط – فعليا خلال مركز الليف (شكل ٦,٢,١٥ ج). يكون قطر اللب حوالي 9μm في المعتاد. النبضة الضوئية الداخلة لهذا اللب الضيّق تُستعرض بشكل قليل جدا مع الزمن خلال مرورها.

التعريض القليل الذي يحدث في ألياف النمط الواحد ليس سببه اتخاذ الضوء مسارات مختلفة؛ بل يحدث بسبب التشتت الاعتيادي في الزجاج. لحمل المعلومات، يجب أن تتغيّر الموجة الضوئية مع الزمن وبالتالي يجب أن يكون لها مدى من

الترددات والأطوال الموجية. كالمعتاد، تسير الأطوال الموجية الأقصر بسرعة أقل من الأطوال الموجية الأطول فتمتد النبضات مع الزمن. للتقليل من تأثيرات التشتت هذه، تعمل الألياف البصرية ذات السرعات العالية عند أطوال موجية تقلل من التشتت، كما أنها تعمل عند أطوال موجية تقلل من فقد الضوء عن طريق الامتصاص في الزجاج. تتقابل هاتان الموجتان عند 1550nm فيما يُعرف بالألياف ذات الانحراف التشتتي، لذا يُستخدم هذا الطول الموجي تحت الأحمر بشكل شائع في الاتصالات الضوئية ذات المسافات الطويلة.

تحقق من فهمك # ٤: إذا كان يبدو كمرآة

(للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

عندما تنظر لحوض سمك من الأمام، فإن جوانب الحوض كثيراً ما تبدو وكأنها مرايا. في الحقيقة تلك الجوانب زجاجية شفّافة، فلماذا تعكس الضوء بشكل جيّد جدا؟

الاتصالات الضوئية

يستخدم المرسل الاعتيادي في الاتصالات الضوئية دايوداً ليزرياً طوله الموجي 1550nm لتوليد نبضات ضوئية قصيرة. تحمل هذه النبضات معلومات من المُرسل إلى مُستقبل بعيد عنه، ويُنتج المُرسل نبضاته بتغيير التيار المار خلال الدايود الليزري. يتم تركيز الضوء الخارج من الدايود الليزري على اللب المكشوف في ليف بصري ذي نمط واحد، فيتبع اللب على طول الطريق إلى الطرف الآخر من الليف. عندما يخرج الضوء، يتم تجميعه بواسطة عدسة ويتركّز على فوتودايود المُستقبِل. كل نبضة من الضوء تتسبب في تدفق نبضة من التيار خلال الفوتودايود، فتسمح للمُستقبِل بالبدء في معالجة المعلومات.

يمكن للدايود الليزري والليف البصري ذي النمط الواحد أن يرسلا بلايين من البت المعلوماتية كل ثانية لمسافة 50km أو 100km دون أي أخطاء تُذكر. عند المسافات الأطول من ذلك، فإن الامتصاص التدريجي للضوء في الزجاج يجعل من الصعب استقبال المعلومات بشكل موثوق. أبسط حل لهذه المشكلة هو استقبال المعلومات قبل أن يُصبح الضوء ضعيفا جدا ثم إعادة إرسالها بواسطة دايود ليزري آخر.

لكن بدلا من إعاقة الإرسال البصري بمُستقبِل ومعيد إرسال، تستخدم بعض أنظمة الاتصالات ذات المسافات الطويلة مضخمات ليفية مطعمة بالإربيوم (EDFAs). الـ EDFA هو جزء من ليف بصري له تقريباً 0.01 % أيون إربيوم في لبه الزجاجي. عندما يتعرّض الـ EDFA لضوء طوله الموجي 980nm أو 1480nm، فإنه يُصبح مضخماً ليزرياً للضوء الذي طوله الموجي 1550nm. وبينما تمر النبضات الضوئية الضعيفة من ليف طويل خلال مضخّم الألياف، فإن المضخّم ينسخ الفوتونات ويزيد من سطوع النبضات. بعد ذلك تستمر هذه النبضات المضخّمة خلال ليف اعتيادي قبل أن تتضخّم مرة أخرى. إن الألياف البصرية الموجودة تحت سطح البحر كثيراً ما توصل مضخمات ألياف بالألياف كل 50km أو نحوه. تسمح هذه المضخّمات للضوء بالسير آلاف الكيلومترات خلال مسار متصل، من أحد أطراف المحيط إلى الآخر.

للاستفادة قدر الإمكان من ليف بصري وحيد، تستخدم العديد من أنظمة الاتصالات عدة دايودات ليزرية تعمل في نطاق مختلف بشكل طفيف من الأطوال الموجية حول الطول الموجي 1550nm. يُدمج الضوء من هذه الدايودات سوية ويُركّز في الليف. عندما يخرج الضوء من الطرف البعيد لليف، فإن نطاقاته ذات الأطوال الموجية المختلفة تنفصل وتوجّه نحو مستقبلات فردية. إن نطاقات الأطوال الموجية المختلفة تكون مثل القنوات المختلفة، بحيث يسمح هذا التجميع للأطوال الموجية بأن يحمل الليف الواحد معلومات أكثر بكثير مما يمكن أن يحمله بضوء من ليزر وحيد. من المدهش أن الـ EDFA يمكنه أن يُضخّم كل هذه القنوات المختلفة في نفس الوقت لأن أيونات الإربيوم يمكنها أن تنسخ نطاقاً واسعاً من الأطوال الموجية.

تحقق من فهمك # ٥: صناعة شيء من لا شيء (للإجابة، انظر صفحة ٤٩٤)

إذا ضعف الضوء تدريجيا بينما يمر خلال ليف بصري طويل، فلماذا لا يمكنك ببساطة أن تنتظر إلى نهاية الليف لتضخيم الضوء القليل المُتبقّي ثم تُرسل الضوء المضخّم إلى مستقبِل؟

خاتمة الفصل الخامس عشر

رأينا في هذا الفصل عدة أجسام شائعة ودرسنا الطرق التي تستخدم بها البصريات. في قسم الكاميرات، رأينا كيف يمكن للعدسة المجمّعة أن تكوّن صورة حقيقية لجسم وكيف يمكن استخدام تلك الصورة الحقيقية لتسجيل منظر على قطعة من الفيلم أو رقيقة مستشعر صور. تعلمنا أدوار البُعد البؤري وعدد f في تحديد حجم وسطوع الصورة الحقيقية وفحصنا بعض التعقيدات التي يجب أخذها في الاعتبار عند تصميم العدسات.

في قسم التسجيل والاتصالات الضوئية، رأينا كيف يتأثر ضوء الليزر بالأجهزة البصرية المتعددة وشاهدنا ماذا يحدث له عند تركيزه في بقعة صغيرة. كما تعلمنا عن الانعكاس الكلي الداخلي وكيف يمكن بهذا التأثير إرسال الضوء لمئات أو آلاف الكيلومترات خلال ليف من زجاج عالي الشفافية.

تجربة: تركيز ضوء الشمس

تكوّن عدسة التكبير صورة حقيقية للشمس على الورقة، وبما أن الشمس بعيدة جدا، فإن بُعد الصورة بين العدسة والورقة يساوي البُعد البؤري للعدسة. إن الصورة الحقيقية هي صغيرة نسبيا، لكنها تحتوي على جميع ضوء الشمس الساقط على سطح العدسة بأكمله. وبتركيز الكثير من الضوء في منطقة صغيرة على الورقة، تُصبح الحرارة الإشعاعية المنتقلة من الشمس إلى الورقة كبيرة جدا فترتفع درجة حرارة الورقة إلى أن تبدأ الورقة بإصدار دخان أو بالاحتراق. تحتوي صورة العدسة أيضا على ضوء من أجزاء أخرى من السماء، ويمكن رؤية هذا الضوء محيطاً بقرص الشمس. بسبب طريقة انعطاف الضوء أثناء تكوين الصورة الحقيقية، فإن السحب في السماء تبدو مقلوبة ومعكوسة على الورقة.

ملخص الفصل

كيفية عمل الكاميرات

تُسقِط عدسة الكاميرا صورة حقيقية للمنظر الذي أمامها على مستشعر الصور داخل الكاميرا. تتكوّن هذه الصورة الحقيقية عندما تعطف العدسة جميع الضوء الواصل إليها من جزء واحد من المنظر إلى جزء واحد من المستشعر. لكي تعمل عملية التصوير هذه بشكل جيّد، ويجب تعديل المسافة بين العدسة ومستشعر الصور بحيث يتجمّع الضوء سوية (يتركّز) بمجرد أن يصل إلى المستشعر. فإذا كان المستشعر قريبا جدا أو بعيدا جدا عن العدسة، فإن الصورة تكون غير واضحة. يعتمد عمق التركيز على القطر الفعّال للعدسة – فتحة العدسة. فكلما صغُرت فتحة العدسة، كان التركيز أقل حرجا لكن قلّ الضوء الذي تجمّعه العدسة. العدسة ذات البُعد البؤري الطويل تركّز الضوء خلفها على مسافة بعيدة، مكوّنة صورة حقيقية كبيرة نسبية لكن خافتة على مستشعر الصور. لجعل هذه الصورة أكثر سطوعا، يجب أن يكون للعدسة ذات البُعد البؤري الطويل فتحة عدسة كبيرة بحيث تجمع الكثير من الضوء. يُصنّف عدد f، والذي هو النسبة بين البُعد البؤري للعدسة وفتحتها، سطوع صورة العدسة.

كيفية عمل التسجيل والاتصالات الضوئية

يستخدم مشغّل الأقراص المدمجة أو أقراص الفيديو الرقمية شعاعاً من ضوء الليزر لقراءة الندب الموجودة على طبقة عاكسة رقيقة داخل القرص. فبينما يدور القرص، تمر الندب خلال شعاع الليزر المركّز ويتذبذب مقدار الضوء المنعكس للأعلى وللأسفل. ويراقب المشغّل الضوء المنعكس ويستخدمه في كل من إعادة تكوين الموسيقى وإبقاء نظامه البصري مصطفاً بشكل صحيح. يسمح إعادة الاصطفاف المستمر للمشغّل بأن يتبع المسار الحلزوني للندب بينما يدور القرص وأن يُبقي شعاع الليزر مركّزا بإحكام على الطبقة العاكسة. إن النظام البصري، والذي يتضمّن الدايود الليزري والعديد من الفوتودايودات وتشكيلة من العدسات وعناصر بصرية أخرى، مصمم ويعمل بشكل جيّد بحيث أن البقعة التي يكوّنها على الطبقة العاكسة محدودة في حجمها الصغير بتأثيرات الحيود فقط بسبب الطبيعة الموجية للضوء.

كما يمكن لضوء الليزر أن يحمل معلومات لمسافات طويلة خلال ليف بصري. يُصنع الليف من لب زجاجي عالي الشفافية ومن كساء من نوع آخر من الزجاج يجعله قادرا على حصر الضوء داخله عن طريق الانعكاس الكلي الداخلي. فبينما يحاول الضوء مغادرة اللب بزاوية ضحلة، فإنه ينعكس تماما من على الطبقة الحديّة مع الكساء ويستمر في السير خلال الليف لمسافات هائلة.

قوانين ومعادلات مهمة:

١. معادلة العدسة: واحد مقسوما على البُعد البؤري لعدسة يساوي مجموع واحد مقسوما على بُعد الجسم وواحد مقسوما على بُعد الصورة، أو (١,١,١٥)

$$\frac{١}{\text{البعد البؤري}} = \frac{١}{\text{بعد الجسم}} + \frac{١}{\text{بعد الصورة}}$$

تحقق من فهمك - الإجابات

١-١٥ الكاميرات

١. هي صورة حقيقية لأضواء الغرفة تكونت بواسطة عدسة التكبير المجمّعة.

لماذا: عدسة التكبير هي عدسة مجمّعة ويمكنها أن تكوّن صورة حقيقية. فهي تُحضر الأضواء المنتشرة للخارج من أضواء الغرفة سوية على الورقة كصورة حقيقية.

٢. تتركّز الخلفية الأكثر بُعدا على مسافة أقرب إلى العدسة مقارنة بتركّز الضوء من صديقك. بما أن الكاميرا تتركّز على صديقك، فستبدو الخلفية خارج التركيز.

لماذا: عندما تكون فتحة عدستك مفتوحة كثيرا، يصبح التركيز حرجا. إن الأجسام التي أمام أو خلف صديقك هي غير مركّزة على مستشعر الصورة وتبدو لذلك غير واضحة.

٣. في اليوم الساطع، تحتاج كاميراتك لفتحة عدسة صغيرة فقط لتجميع ضوء كافٍ من التعرّض، لذا فإن عمق التركيز كبير. بينما في اليوم المظلم، تستخدم الكاميرا أكبر فتحة عدسة ممكنة لتجميع الضوء ولها عمق تركيز صغير.

لماذا: تجميع الضوء وعمق التركيز مرتبطان ببعضهما البعض. إذا كان عليك أن تفتح فتحة عدسة كاميراتك لتجميع ضوء كافٍ للتعرّض، فإن التركيز سيصبح حرجا وسيكون لصورتك الفوتوغرافية عمق تركيز أقل.

٤. لعدسة التكبير عنصر زجاجي واحد وتُعاني من الزيغ اللوني (والعديد من عيوب الصورة).

لماذا: لا يمكن لعدسة مجمّعة أن تكوّن صورة ذات جودة عالية على سطح مستوٍ لأن لها زيغ لوني، وزيغ كروي، وكوما واستجماتزم (لانقطية). إذا كانت العدسة صغيرة، فإن هذه العيوب في الغالب تكون مخفيّة. لكن في عدسة التكبير الكبيرة، فإن جميعها واضحة ولا يمكنك تكوين صورة واضحة لجميع المصباح الضوئي.

٥. ابتداء، تكوّن العدسة صورة حقيقية قُرب عينك. تتحرك هذه الصورة الحقيقية عبرك بينما تقترب العدسة من الصورة الفوتوغرافية. أخيرا، العدسة قريبة بما يكفي لتكوين صورة خيالية مكبّرة للصورة الفوتوغرافية.

لماذا: تكوّن عدسة التكبير إما صورة حقيقية أو خيالية اعتمادا على بُعد الجسم والبُعد البؤري للعدسة. فإذا كانت المسافة الفاصلة بين العدسة والصورة الفوتوغرافية أكبر من البُعد البؤري، فإن الصورة حقيقية وتراها بالقرب من عينك. يمكنك لمس الصورة المقلوبة أو إسقاطها على ورقة. أما إذا كانت المسافة الفاصلة بين العدسة والصورة الفوتوغرافية أقل من البُعد البؤري، فإن الصورة المعتدلة خيالية وتراها على الجانب البعيد عن العدسة.

٦. تتسبب أشعة إكس في حدوث انتقالات إشعاعية في بلورات أملاح الفضة.

لماذا: يمكن لأشعة إكس أن تتخلل خلال أجسام معتمة وتصل إلى الفيلم. فإذا امتصت بلورات ملح الفضة في الفيلم أشعة إكس، فإنها ستستجيب كما لو أنها تعرضت لضوء مرئي. وعلى الرغم من أن معظم أجهزة الكشف الحديثة تستخدم مصادر أشعة إكس ضعيفة بحيث أن تأثيرها طفيف، إلا أن الكشف المتكرر لفيلم ذي سرعة عالية سيتلفه تدريجيا.

٧. تستخدم نظارات قصر النظر على عدسات مفرّقة، والتي تعطف أشعة الضوء بعيدا عن بعض ولا تُركّزها سوية لتكوين صورة حقيقية.

لماذا: لتكوين صورة حقيقية لمنظر بعيد، تحتاج لأن تأتي بالأشعة الضوئية سوية

باستخدام عدسة مجمّعة. إن العدسات المفرّقة تفرّق الأشعة الضوئية ولا يمكنها أن تكوّن صور حقيقية بذاتها.

١٥-٢ التسجيل البصري والاتصالات

١. يحوّل ميكروفون هاتفك الجوّال صوتك إلى تيار متذبذب. يقاس هذا التيار بصفة دورية ويُمثّل كسلسلة من الأرقام. بعد ذلك، تُمثّل الأرقام بموجات راديو وتُنقل خلال الفراغ. تجد هذه الأرقام طريقها في الهاتف الجوّال المستقبِل، حيث تحوّل موجات الراديو إلى أرقام وتحوّل الأرقام إلى تيار متذبذب. أخيرا، يُضخ التيار ويُرسل خلال سمّاعة لتكوين الصوت.

لماذا: تستخدم العديد من أجهزة الاتصال الحديثة تمثيل رقمي للصوت. في اتصالات موجة الراديو، التمثيل الرقمي مفيد على وجه الخصوص لأنه يحجب الضوضاء المصاحب لنقل موجات الراديو ويسمح أيضا لاستخدام أكثر كفاءة لعرض نطاق موجات الراديو.

٢. يجب أن تصبح الندب نصف عمق الندب الحالية.

لماذا: يجب أن يكون عمق الندب في الطبقة العاكسة تقريبا ربع طول موجي بحيث الضوء المنعكس من أسفل الندبة يتداخل تداخلا هدّاما مع الضوء المنعكس من على المنطقة المستوية المجاورة. فإذا تغيّر الطول الموجي للضوء إلى ٤٠٠nm، تقريبا نصف القيم الحالية، فإن الندب يجب أن تتغيّر لحوالي نصف عمقها الحالي.

٣. يجب أن يكون الضوء في مشغّل الأقراص المدمجة أو أقراص الفيديو الرقمية مترابطا بحيث يمكن تركيزه في بقعة واحدة محدودة بالحيود فقط على الطبقة العاكسة وتواجه تداخلا هدّاما عندما تواجه ندبة.

لماذا: لا يمكنك تركيز الضوء من المصباح المتوهّج في بقعة محدودة بالحيود فقط. كل فوتون يغادر المصباح هو فوتون مستقل وسوف يتركّز عند نقطة مختلفة في الفراغ. كما أن ضوء المصباح المتوهّج غير المترابط لا يتعرّض لتأثيرات التداخل القوية كما في ضوء الليزر.

٤. يُعاني الضوء الذي تراه من انعكاس كلي داخلي بينما يحاول مغادرة الزجاج بزاوية ضحلة. يمكنك أن ترى انعكاسا تاما للسمكة التي داخل الحوض.

لماذا: يعاني الضوء من مشكلة عند مروره من الماء أو الزجاج إلى الهواء بزاوية ضحلة. عندما يحاول المرور فإنه يواجه انعكاساً كلياً داخلياً ويرتد من على السطح دون أن يفقد أي شدة على الإطلاق.

٥. بينما يُمتص الضوء، فإن عدد الفوتونات في النبضة يتناقص تدريجيا. عندما يصل هذا العدد إلى صفر، فلا يوجد هناك أي شيء يمكن تضخيمه.

لماذا: تحتوي كل نبضة ضوئية في الليف على عدد محدود من الفوتونات. يمتص الزجاج العديد من هذه الفوتونات أثناء مسارها الطويل خلال الليف، لذا يجب تضخيمها قبل أن تُصبح أعدادها صغيرة جدا بحيث يكون هناك احتمال أن لا يصل أي منها لنهاية الليف.

دقق في أرقامك - الإجابات

١٥-١ الكاميرات

١. سوف تتكوّن الصورة عند مسافة هي ضعف البُعد البؤري خلف العدسة.

لماذا: بما أن بُعد الجسم هو ضعف البُعد البؤري، فيمكنك استخدام المعادلة (١٥,١,١) لإيجاد بُعد الصورة:

$$\frac{١}{\text{البعد الجسم}} = \frac{١}{\text{البعد البؤري}} - \frac{١}{\text{بعد الصورة}} = \frac{١}{\text{البعد البؤري}} - \frac{١}{٢ \cdot \text{البعد البؤري}} = \frac{١}{٢ \cdot \text{البعد البؤري}}$$

بُعد الصورة هو ضعف البُعد البؤري للعدسة.

تمارين

١. في يوم مشمس ساطع، يمكنك استخدام عدسة التكبير لحرق الخشب بتركيز ضوء الشمس عليه. يكوّن ضوء الشمس المركز بقعة دائرية صغيرة من الضوء والتي تُسخن الخشب إلى أن تحرقه. لماذا تكون بقعة الضوء دائرية؟

٢. يكوّن الضوء المار خلال كأس ماء مقوّسة صورة للهب الشمعة على الجدار بجوار الطاولة. لماذا يكون تحريك الشمعة نحو الكأس أو بعيدا عنها يُفسد هذا التأثير؟

٣. نظارات القراءة البسيطة هي عدسات مجمّعة تأتي في تشكيلة من القوى، تتراوح من 0.25 ديوبتر (تقريبا زجاج مستوٍ) إلى 3 ديوبتر (مقوّسة بشدة). أي العدسات لها بُعد بؤري أقصر: 1 ديوبتر أم 2 ديوبتر؟

٤. في فيلم، تُرسل نظارات الممثّل الطبية انعكاسا لحظياً غير مشوّه للشمس على الكاميرا. لماذا يخبرك هذا الانعكاس البسيط بأن تلك النظارات هي فقط ديكور تمثيلي ولا يحتاج الممثّل لنظارات طبية؟

٥. يستخدم جزء من نظام اتصالات ذي ليف بصري عدسة لتركيز الضوء من ليزر شبه موصّل على نهاية ليف بصري. يقع مصدر الضوء الصغير جدا والليف على جانبين متعاكسين من العدسة، وكل منهما على بُعد 1cm من العدسة. لماذا يجب أن يكون للعدسة بُعد بؤري مقداره 0.5cm؟

٦. يقترب ضوء من جسم بعيد من العدسة الشيئية لتليسكوب كمجموعة من الأشعة الضوئية المتوازية. ارسم تمثيلاً للأشعة الضوئية القادمة من ثلاثة نجوم مارة خلال عدسة مجمّعة لتوضح أنها تتركّز عند ثلاثة مواقع منفصلة.

٧. كثيراً ما يستخدم المصورون الفوتوغرافيون للألعاب الرياضية فتحات عدسة كبيرة لعدسات ذات بُعد بؤري طويل. ما هي القيود التي تفرضها هذه العدسات على الصور الفوتوغرافية؟

٨. إذا كنت تأخذ صورة شخصية لصديق وأردت الأجسام التي في المقدمة والخلفية أن تظهر غير واضحة، كيف يجب أن تعدّل فتحة عدسة الكاميرا وسرعة الغالق؟

٩. تتكوّن كاميراتك الجديدة ذات بُعد بؤري 35mm من عدستين، عدسة «طبيعية» بُعدها البؤري 50mm وعدسة «تيليفوتو» (تقريبية) لها بُعد بؤري 200mm. أقل عدد f لعدسة الـ 50mm هو 1.8. بالرغم من أن عدسة الـ 200mm لها عناصر زجاجية أكثر في داخلها، إلا أن أقل عدد f لها هو 4. لماذا عدد f لعدسة التيليفوتو أكبر بكثير؟

١٠. إذا أمسكت بكاميراتك عند ثقب صغير في سياج، ستكون قادرا على أخذ صورة للمنظر الموجود على الجانب الآخر. ولكن يجب أن يكون زمن التعريض طويلا جدا، وسيكون عمق التركيز كبيرا بشكل مدهش. فسّر ذلك.

١١. لماذا إغماض عينيك نصف إغماضة يزيد من عمق التركيز لديك؟

١٢. لماذا يكون أسهل لعدسة عينك أن تكوّن صورة واضحة على شبكيتك عندما يكون المنظر الذي أمامك ساطعا وقزحية عينك صغيرة جدا؟

١٣. الأشخاص الذين يحتاجون لارتداء نظارات طبية يجدون من الصعب الرؤية بوضوح بدون النظارات في حالات تكون الإضاءة فيها خافتة وقزحية عينيهما منفتحة جدا. لماذا؟

١٤. التليسكوبات الفوتوغرافية هي ببساطة كاميرات ضخمة. بما أن لها أعداد f صغيرة فإن عمق تركيزها صغير. لماذا لا يُعد ذلك مشكلة في الأبحاث الفلكية؟

١٥. لعدستين مكبرتين تبدوان متماثلة تكبيران مختلفان. أحدهما معلّمة بـ 2x (مرتين)، والأخرى 4x (أربع مرات). أي العدستين لها البُعد البؤري الأطول؟

١٦. أي من عدستي التكبير في تمرين ١٥ يجب أن تمسك بها أكثر قُربا من الجسم الذي تنظر إليه لكي يمكنك رؤية صورة خيالية لذلك الجسم على مسافة بعيدة؟

١٧. يجب أن تتحرك العدسة الشيئية في مشغّل أقراص الفيديو الرقمية بسرعة لإبقاء شعاع الليزر مركّزا على الطبقة العاكسة في القرص. لماذا يجب أن يكون لهذه العدسة كتلة صغيرة جداً؟

١٨. لماذا لا تعمل مشغّلات الأقراص المدمجة أو أقراص الفيديو الرقمية المتنقلة بشكل جيّد إذا هززتها ذهابا وإيابا بسرعة كبيرة؟

١٩. ماذا يحدث لشعاع ضوئي يدخل البلاستيك من الهواء بزاوية مع الحد الفاصل بين الوسطين؟

٢٠. لماذا يتأخر تركيز شعاع الليزر عند دخوله للطبقة البلاستيكية في الأقراص المدمجة أو أقراص الفيديو الرقمية ؟ (ارسم شكلا توضيحيا.)

٢١. لماذا ينفرج شعاع الليزر بسرعة بعد أن يمر خلال ثقب صغير جدا؟

٢٢. يقيس العلماء المسافة إلى القمر عن طريق ارتداد ضوء ليزر من على عاكسات تُركت على القمر من قِبل رواد فضاء مركبة أبولو. يتم إرسال هذا الضوء عكسيا خلال تيليسكوب بحيث يبدأ رحلته إلى القمر من فتحة كبيرة. تقلل هذه العملية من حجم شعاع الليزر عندما يصل إلى القمر. فسّر ذلك.

٢٣. بينما يمر شعاع ليزر المشغّل خلال العدسة التي تركّزه على طبقة الألومنيوم في القرص المدمج ، يكون قطره أكبر من 1mm. لماذا يسمح حجم الشعاع الكبير له عند مغادرته العدسة بالتركيز في بقعة أصغر؟

٢٤. لماذا يمكن للضوء من ليزر أزرق أن يكوّن وسط شعاع أضيق من ضوء ليزر تحت الأحمر؟

٢٥. بعض الأحيان تبدو أسطح كأس من الماء وكأنها مرايا عندما تنظر إليها خلال الماء. فسّر ذلك.

٢٦. عندما تنظر لداخل مقدمة مزهرية زجاجية مربعة مليئة بالماء، فإن جوانبها تبدو وكأنها مرايا. لماذا تبدو الجوانب لامعة؟

٢٧. بعض من ضوء الليزر الساقط على الطبقة العاكسة لقرص الفيديو الرقمي يسقط على المنطقة المستوية حول ندبة وينعكس عائدا نحو الفوتودايود. كيف تقلل هذه الموجة المنعكسة فعلياً من مقدار الضوء المكتشف من قبل الفوتودايود؟

٢٨. لماذا يبدو سطح قرص الفيديو الرقمي ملونا عند وضعه تحت الضوء الأبيض؟

مسائل

١. لكاميراتك عدسة ذات بُعد بؤري 35mm. عندما تأخذ صورة فوتوغرافية لجبل بعيد، على أي بُعد تقع الصورة الحقيقية للجبل بالنسبة للعدسة؟

٢. إذا استخدمت عدسة بُعدها البؤري 35mm لأخذ صورة فوتوغرافية لزهور تبعد 2m عن العدسة، على أي بُعد من تلك العدسة تتكوّن الصورة الحقيقية للزهور؟

٣. تحاول أخذ صورة فوتوغرافية لتمثالين صغيرين بعدسة تيليفوتو (تقريبية) بُعدها البؤري 200mm. أحد التمثالين على بُعد 4m من العدسة، والتمثال الآخر على بُعد 5 m من العدسة. أي التمثالين تتكون صورته الحقيقية أقرب إلى العدسة؟ وما مقدار هذا القُرب؟

٤. عندما تضع جسم على بُعد 30cm من عدستك التكبيرية، تتكوّن صورة حقيقية على بُعد 30cm من العدسة في الجانب المعاكس. يمكنك أن ترى هذه الصورة بشكل خافت على قطعة من الورق. ما هو البُعد البؤري لعدسة التكبير؟

٥. عندما يمر ضوء مصباحك المكتبي خلال عدسة بُعدها البؤري 50mm، فإنها تكوّن صورة حقيقية واضحة على ورقة تقع على بُعد 50.5mm من العدسة. كم يبعد المصباح المكتبي عن العدسة؟

الفصل ١٦

الفيزياء الحديثة

في السنوات الأخيرة، أصبح العلماء ينظرون بشكل أعمق في الذرة لرؤية كيفية تكوّنها، وينظرون بشكل أبعد في الفضاء لرؤية كيف يعمل الكون، وينظرون بعناية أكبر للأجسام لرؤية كيف يمكن فهم الأشياء المعقدة بدلالة قوانين بسيطة. ومن ضمن أهم الأدوات الموجودة في خدمة هؤلاء العلماء هي النظرية الكمية والنظرية النسبية. سيتطرق هذا الفصل لبعض الطرق التي تساهم بها الفيزياء الحديثة في حياتنا.

تجربة: ورق مُتلف بالإشعاع

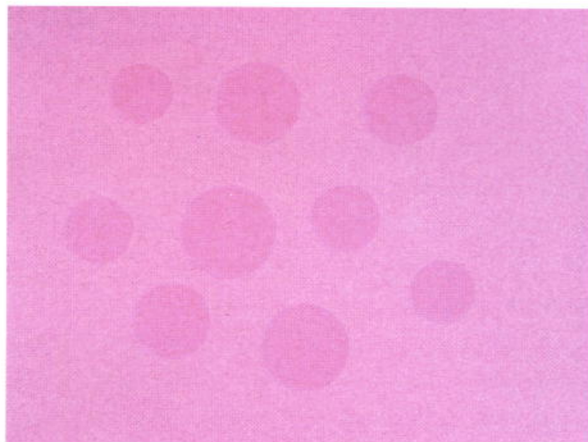
يتضمن أحد مسارات الفيزياء الحديثة التحكم في الإشعاع ذي الطاقة العالية واستخدامه. وفي حين أن السماحية للوصول لمعظم أشكال الإشعاع ذي الطاقة العالية مقيّدة، إلا أن هناك مصدراً واحداً يمكن لأي شخص أن يستخدمه: ألا وهو الشمس. وبسبب أن الضوء فوق البنفسجي للشمس نشط بما يكفي لإتلاف الروابط الكيميائية وإعادة ترتيب الجزيئات، فإنه يمكن أن يوفّر لنا نظرة بسيطة للتأثيرات التي تحدث بأشعة إكس وما هو أبعد من ذلك.

لرؤية ضرر الشمس بنفسك، عرّض بعض الورق المقوّى الملوّن لضوء الشمس المباشر لعدة أيام. غطّ الورق ببعض الأجسام المعتمة مثل العملات النقدية وضعها بالخارج. لا تُغطّ الورق بالزجاج لأن الزجاج يمتص الضوء فوق البنفسجي بما يكفي لتبطئة عملية الإتلاف. بعد يوم أو اثنين، ستجد أن أجزاء الورق المكشوفة قد أصبحت باهتة؛ لقد أتلفت أشعة الشمس فوق البنفسجية بعضاً من جزيئات الصبغة في الورق. إذا وجدتَ أنه لم يحدث شيء، فهذا يعني أن جزيئات الصبغة قوية بما يكفي لتحمّل الضوء فوق البنفسجي لمدة أطول.

أعد التجربة مرة أخرى بأوراق مختلفة وألوان مختلفة. هل يمكنك التنبؤ أي الأوراق ستبهت أسرع؟ شاهد النتائج وانظر إن كانت تحقق تنبؤاتك. حاول أن تقيس معدل تلف جزيئات الصبغة. هل يبدو أن لها عمر – النصف؟ كيف يمكنك أن تعرف ذلك؟

يظهر نفس هذا التبييض البصري على الأشياء المعروضة في نوافذ المتاجر وعلى أثاث الحدائق. كانت هذه يوماً ما هي الطريقة الوحيدة التي يستخدمها الأشخاص لتبييض الأقمشة. كما أن ضوء الشمس فوق البنفسجي يضُر جلدك عندما تجلس في الشمس: إن الحرق بالشمس ليس ضرراً حرارياً، بل هو ضرر إشعاعي.

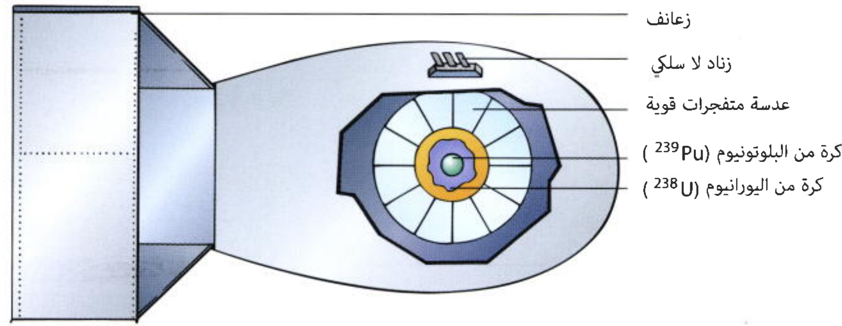




بإذن من لوي بلومفيلد

دليل الفصل

من حسن الحظ أن الضوء فوق البنفسجي لا يمكنه أن يخترق جسمك لعمق كبير. في الأسلحة النووية، سوف ننظر لأشكال من الإشعاع ذات قابلية أعلى للاختراق. كما سنفحص تركيبات أنوية الذرات ونرى كيف أن تفكيكها أو دمجها يمكن أن يحرر كميات هائلة من الطاقة. في التصوير الطبي والإشعاع، سوف نفحص الإشعاع ذا الطاقة العالية ونرى كيف يُستخدم للمساعدة بدلا من الإيذاء. سوف ندرس الطرق التي تُنتج بها أشعة إكس وأشعة جاما وكيف تتفاعل مع الذرات والجزيئات في جسم المريض. سوف ننظر أيضا في معجّلات الجسيمات التي تُنتج جسيمات ذات طاقة عالية للعلاج الإشعاعي. أخيرا، سوف نناقش مبادئ التصوير المقطعي CT والرنين المغنطيسي MRI، واللذين يجعلان من الممكن إعداد خرائط مفصّلة لداخل المرضى دون لمس أجسامهم أبدًا . لمزيد من المعلومات التمهيدية، انظر ملخص الفصل في صفحة ٥٢٣.



١٦-١ الأسلحة النووية

القنبلة الذرية هي أحد الاختراعات المذهلة وسيئة السمعة في القرن العشرين. تبع هذا الاختراع حذوة بحذوة التطورات المتعددة في محاولة فهم الطبيعة، وهي تطورات جعلت اختراع الأسلحة النووية محتما. في أواخر الثلاثينيات، كان العلماء قد اكتشفوا معظم المبادئ التي تقع خلف الطاقة النووية وكانوا على دراية كبيرة حول كيفية إمكان تطبيق هذه المبادئ. ظهر مع بداية الحرب العالمية الثانية قلق حول إمكانية اختيار ألمانيا المسار العسكري للطاقة النووية. مدفوعون بالخوف والفضول والإغواء، أحضر العلماء والمهندسون والسياسيون الأسلحة النووية إلى الوجود. لقد عاش العالم تحت ظل هذه الأجهزة المخيفة منذ ذلك الحين.

أسئلة للتفكير

أين تُختزن الطاقة النووية في الذرات؟ من أين أتت هذه الطاقة النووية؟ كيف تحرّر الأسلحة النووية الطاقة النووية؟ لماذا من الصعب بناء الأسلحة النووية؟ لماذا نربط اليورانيوم والبلوتونيوم بالأسلحة النووية؟ ما مقدار اليورانيوم والبلوتونيوم المطلوب لصناعة قنبلة؟

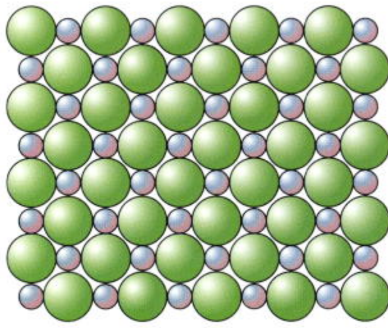
تجارب يمكن القيام بها

بما أن اليورانيوم والبلوتونيوم لا تُباع في المتاجر، فلن تتمكن من بناء قنبلتك الخاصة. لكن يمكنك الشعور بطريقة عمل التفاعل التسلسلي باللعب بعلبة الدومينو. إذا أوقفت شرائح الدومينو على حافتها على طاولة مستوية، فإن كل واحدة منها سيكون لها طاقة جذب كامنة إضافية والتي يمكن تحريرها بإسقاطها. إذا نشرت الدومينو متباعدة عن بعضها على الطاولة ثم هززت الطاولة برفق، فستسقط الدومينو واحدة تلو الأخرى.

لكن إذا أوقفت الدومينو قريبة من بعضها، بحيث يمكن لقطعة دومينو ساقطة أن تُسقط أخرى، فإنها لن تكون مستقلة الآن. فبينما تقوم بهز الطاولة، لن يحدث شيء إلى أن تسقط الدومينو الأولى، لكن بعد ذلك سيسقط العديد أو الكل في تتابع سريع. ستكون قد أنشأت تفاعلاً متسلسلاً، حيث يثير حدث واحد عدداً متزايداً من الأحداث المتتابعة. ما هي صفات الدومينو وترتيبها التي تحدد إمكانية حدوث تفاعل متسلسل أو عدم إمكانيته؟ هل يمكنك تخيّل سيناريو يكون فيه سقوط دومينو واحد سبباً في إثارة كمية هائلة من الطاقة المختزنة؟ إن تفاعلاً تسلسلياً آخر، هذه المرة في اضمحلال أنوية ذرية، هو ما يجعل الأسلحة النووية ممكنة.

خلفية

في نهاية القرن التاسع عشر، كانت «الفيزياء التقليدية» مهيمنة. الفيزياء التقليدية هنا تعني قوانين الحركة والجاذبية المعرّفة من قِبل أشخاص مثل غاليليو ونيوتن وكيبلر، وقوانين الكهرباء والمغنطيسية التي طوّرها آخرون من بينهم أمبير وكولوم وفارادي وماكسويل. في العموم كان الشعور السائد أن معظم الفيزياء مفهومة بشكل جيّد: عَلِم الفيزيائيون جميع القوانين التي تحكم سلوك الأجسام في كوننا، وما بقي هو تطبيق هذه القوانين على المزيد من الأمثلة المعقدة. كان وقتاً لم يعلم الفيزيائيون ما جهلوه.







شــكل ١,١,١٦: بلورة الملح هــي مصفوفة منتظمة من أيونات صوديوم موجبة الشحنة وأيونات كلورايد سالبة الشــحنة. تترابط هذه الأيونات سوية بالقوى التجاذبية بين الأيونات المشــحونة بشــحنات متعاكسة. الأيونات صغــيرة جدا بحيث يوجد حــوالي ٧,٢ مليون أيون على حافة بلورة ملح عرضها 1mm.

لكن بقيت بعض المعضلات الملحة - صعوبات معينة لم يُتمكن من تفسيرها باستخدام قوانين الفيزياء التقليدية. ومن ضمن هذه المعضلات الطيف المنبعث من جسم أسود، والظاهرة الكهروضوئية والتي تخرج فيها إلكترونات من معدن عند تعرض المعدن للضوء، وما بدى كغياب الأثير أو الوسط الذي يسير خلاله الضوء. عند بدء القرن العشرين، انهارت جميع الفيزياء التقليدية تحت وطأة ما بدى أنها صعوبات تافهة، ونشأ فهم أكثره جديد للكون. أخذت التطورات الرئيسية ٢٥ عاماً، من ١٩٠١ إلى ١٩٢٦م، وتم قضاء معظم الوقت منذ ذلك الحين في تطبيق هذه القوانين الجديدة لأمثلة أكثر تعقيدًا.

كان التطوران الرئيسيان، وكلاهما جوهريان في صناعة القنبلة النووية، اكتشاف الفيزياء الكمية والنسبية. كثيراً ما تُسمّى هذه بالنظرية الكمية والنظرية النسبية. لكن في حين أنه قد تدل كلمة نظرية على أنهما على أرضية مهزوزة، إلا أنهما ليستا نظريات بمعنى فرضيات تنتظر التجربة. في الواقع، تم إثباتها العديد من المرات منذ أن تطورت وتم توضيح أن لها قوة تنبؤ هائلة. بدلا من ذلك، هي نظريات بمعنى أن قوانينها المبنية والمصنّفة بعناية تمثّل سلوك الكون الفيزيائي الذي نعيش فيه. بين هاتين النظريتين كان اكتشاف القوى النووية والطاقة النووية حتميا. أخيرا، جعل حب الأشخاص للأدوات والسلطة من تطوير الأسلحة النووية حتميًا أيضًا.

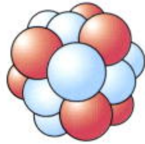
تحقق من فهمك # ١: نظريا، ذلك يعني ... (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

إذا أشير لشيء بأنه «نظرية»، فما هو احتمال كونه صحيحاً؟

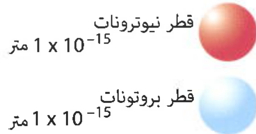
النواة والاضمحلال الإشعاعي

على الرغم من أن الاسم قنبلة «ذرية» قد استمر لأكثر من نصف قرن، إلا أن الاسم الأصح يجب أن يكون قنبلة «نووية». الأجزاء المسؤولة عن الطاقة المتحررة من الأسلحة النووية ليست ذرات، بل أجزاء من الذرات - أنويتها (جمع نواة). لكن قبل أن نستطيع نقاش الأنوية، دعنا نضعها في سياق. لنبدأ بالنظر في الذرات.

لأخذ فكرة عن مقدار صِغر الذرات، تخيّل تكبير حبة من ملح الطعام، طول حافتها 1mm (0.04in)، إلى أن تصل لحجم ولاية كولورادو. ستبدو تلك الحبة كترتيب منتظم من جسيمات كروية، حجم كل منها حوالي حجم حبة الجريب فروت (شكل ١,١,١٦). هذه الجسيمات الكروية ستكون ذرات منفردة، وسيكون هناك حوالي 7.2 مليون منها على طول كل حافة من حواف الحبة.



نواة صوديوم
11 بروتونات ، 12 نيوترونات



شكل ٢,١,١٦: يوجد في مركز أيون الصوديوم نواة صغيرة جدا تحتوي على حوالي 99.975 % من كتلة الأيون. تتكون النواة من 11 بروتون موجب الشحنة و12 نيوترون متعادل الشحنة. تتنافر البروتونات مع بعضها البعض عند أي مسافة، لكن البروتونات والنيوترونات مرتبطة سوية عن طريق القوة النووية التجاذبية طالما أنها تتلامس.

مثل معظم الجوامد، ملح الطعام هو بلورة وترتبط ذراتها ببعضها البعض عن طريق مكوناتها الأكثر بُعدا: أي إلكتروناتها. تهيمن الإلكترونات على كيمياء الذرات والجزيئات. إن الصوديوم هو معدن تفاعلي بسبب إلكتروناته، والكلورين هو غاز تفاعلي بسبب إلكتروناته، وعند مزج هاتين المادتين الكيميائيتين فإنهما تتفاعلان بعنف لتكونا ملح الطعام وتحررا مقداراً كبيراً من الضوء والحرارة. هذا إذاً هو «قنبلة نووية» حقيقية.

من الواضح أن هناك شيئًا مفقودًا. إذا استطاع شخص مجنون أن يشتري كيلوجراماً أو كيلوجرامين من الصوديوم وخزّاناً من الكلورين من شركة مواد كيميائية ويدمر مدينة بأكملها، فإن العيش في الريف سيكون محبذًا أكثر. من حسن الحظ أن الطاقة المتحررة من التفاعلات الكيميائية محدودة نوعاً ما، فلا يمكن لكيلوجرام من متفجرات كيميائية أن تُحدث تلفاً عظيماً، ولكن القنابل النووية تصل لمخزون طاقة مختلف تماما في عمق الذرات.

في حين تُنسب في كثير من الأحيان جميع الأسلحة النووية لمعادلة أينشتاين الشهيرة $E = mc^2$ ، إلا أن تلك الفكرة مبسطة جدا. ومع ذلك، تُعد هذه المعادلة مهمة جدا. وكما أشرنا في القسم ٤-٢، أن أحد اكتشافات أينشتاين في بداية القرن العشرين كان أن المادة والطاقة متكافئتان في بعض النواحي، وفي حالات معيّنة يمكن أن تصبح الكتلة طاقة أو تُصبح الطاقة كتلة. هذا التكافؤ هو جزء من النظرية النسبية وله بعض النتائج المثيرة. فهو يشير ضمنًا أن الجسم يمكنه تقليل كتلته عن طريق نقل طاقة لمحيطه. وبالتالي، إذا وزنت جسماً قبل وبعد خضوعه لتحوّل داخلي، فيمكنك استخدام أي فقد في الوزن لتحديد كمية الطاقة المتحرّرة من الجسم عن طريق ذلك التحوّل.

بسبب هذا التكافؤ، يمكن استخدام الكتلة والتغيّرات في الكتلة لإيجاد الطاقة المخفية داخل المواد الطبيعية، وهذه التقنية مهمة في الفيزياء النووية، لكنها تنطبق أيضا على الكيمياء. فعندما يتفاعل الصوديوم والكلورين لتكوين ملح الطعام، فإن كتلتهما المدمجة تقل بمقدار صغير جدا. إن الكتلة المفقودة هي بعض من الطاقة الكيميائية الكامنة، والتي تُصبح ضوءاً وحرارة وتهرب من المزيج. عند المغادرة، تقلل هذه الطاقة الكيميائية الكامنة كتلة مزيج الصوديوم والكلورين بحوالي 1 جزء من 10 بليون جزء. هذا التغيّر الصغير جداً في الكتلة لا يمكن اكتشافه بأجهزة القياس الحالية، بالرغم من أن العلماء يعملون على إيجاد تقنيات ستجعل من الممكن قريبا قياس تغيرات الكتلة بسبب الروابط الكيميائية.

لكن الإلكترونات هي أخف جزء من الذرة إلى حد بعيد وبالتالي لها كتلة صغيرة يمكن أن تتحرّر كطاقة. معظم كتلة الذرة تقع في نواتها. إن النواة صغيرة بشكل مدهش – فقطرها أكبر بعض الشيء من 10^{-15}m. إذا كنت ستنظر لواحدة من أيونات الصوديوم التي لها حجم الجريب فروت في بلورة الملح العملاقة، سوف ترى جسماً صغيراً جدا في مركزها. هناك، على عتبة مجال الرؤية، سترى نواة الأيون، قطرها فقط 1µm (0.00004in). الـ 99.9999999999٪ المتبقي من الأيون يشغله فقط إلكترونات الصوديوم العشرة في مداراتها.

تحتوي نواة الصوديوم على 11 بروتون و12 نيوترون (شكل ٢,١,١٦). كل من هذه الجسيمات النووية أو النيوكلونات له كتلة حوالي 2000 ضعف كتلة الإلكترون، فـ 99.975٪ من كتلة أيون الصوديوم تقع في نواته. هكذا، وبالرغم من أن الإلكترونات مهمة بالتأكيد في الكيمياء وعلم المواد كما نعرفه، إلا أن مساهمتها في كتلة الأيون لا تكاد تُذكر. فمعظم الأيون فراغ ومعبأ قليلا بزغب إلكتروني وله كتلة نووية صغيرة جدا في مركزه.

تواجه النيوكلونات التي تكوّن هذه النواة قوتين متنافستين. أولى هذه القوتين هي التنافر الكهروستاتيكي المألوف بين الشحنات الكهربائية المتشابهة. ولأن لكل بروتون في النواة شحنة موجبة واحدة، فإنها باستمرار تحاول دفع بعضها البعض لخارج النواة. ولكن القوة الثانية من هاتين القوتين هي تجاذبية وتمسك بالنواة سوية. تُسمّى هذه القوة الجديدة بالقوة النووية، وعند المسافات القصيرة تهَيْمن هذه القوة على التنافر

بإذن من لوي بلومفيلد



شكل ٣,١,١٦: تُخزّن هذه اللعبة القافزة طاقة في زنبركها المضغوط وتحافظ على تلك الطاقة بينما يُمسك جزؤها الماص بقاعدتها. عندما ينفصل الجزء الماص، تقفز اللعبة في الهواء.

الكهروستاتيكي الأضعف، ولكن القوة النووية تجذب النيوكلونات نحو بعضها البعض فقط عندما تتلامس، وبمجرد أن تنفصل النيوكلونات فإنها تكون وحدها.

إن المنافسة بين هاتين القوتين، القوة الكهروستاتيكية التنافرية بين الشحنات المتشابهة والقوة النووية التجاذبية بين النيوكلونات، تحاكي ما يحدث في لعبة مألوفة (شكل ٣,١,١٦ و ٤,١,١٦). لهذه اللعبة القافزة جزء ماص متصل بزنبرك، بحيث يحاول الزنبرك أن يفصل بين الجزء العلوي من اللعبة وقاعدتها، بينما يحاول الجزء الماص أن يُبقي الجزئين مترابطين. عندما يكون الجزءان منفصلين، فالزنبرك فقط هو الذي يبذل قوة، ولكن عندما يتلامس الجزءان، يبدأ الجزء الماص بالعمل ويمسك بالجزئين سوية.

إن الذي يجعل اللعبة القافزة مثيرة هو أن جزءها الماص يُسرّب الهواء. فبعد حين، ينفلت الجزء الماص ويسمح للزنبرك بقذف اللعبة في الهواء. لكن افترض أن الجزء الماص لا يُسرّب الهواء. بمجرد أن تُدفع الأجزاء سوية فإنها لن تنفصل أبدا وسيحافظ الزنبرك على طاقته المختزنة إلى ما لا نهاية. لجعل الجزء الماص ينفلت، ستحتاج لسحبه بعيدا عن القاعدة. هنالك فقط سيستطيع الزنبرك أن يحرّر طاقته المختزنة.

في الحقيقة، سيكون هناك حاجز طاقة يمنع اللعبة عديمة التسرّب من القفز. إلى أن تقوم بشغل قليل في سحب الجزء الماص بعيدا عن القاعدة، فلن تكون اللعبة قادرة على تحرير طاقتها المختزنة. مثال آخر لنظام يحتاج طاقة لتحرير طاقة هو زجاجة مشروب غازي بسدادة فلينية، حيث يجب عليك أن تدفع السدادة لكي تساعدها على الخروج من عنق الزجاجة. بعد ذلك الاستثمار الأولي للطاقة، فإن كمية كبيرة من الطاقة تُحرّر عند دفع الغاز للسدادة عبر الغرفة.

النواة لها نفس الحالة. تمنع القوة النووية التجاذبية من تفكك النواة، على الرغم من الكمية الهائلة من الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي تحتويها. تكوّن الطاقة النووية حاجز طاقة يمنع النيوكلونات من الانفصال. فما لم يوجد شيء يُضيف طاقة للنواة لمساعدة النيوكلونات في التحرّر من القوة النووية، فستظل النواة مترابطة إلى الأبد. على الأقل هذا هو تنبؤ الفيزياء التقليدية.

لكن الفيزياء الكمية لها تأثير مهم على سلوك النواة. إن أحد التأثيرات الغريبة الكثيرة للفيزياء الكمية هو أنك لا تستطيع الجزم أين يقع جسم، أو على الأقل لا تستطيع الجزم بموقع الجسم لفترة طويلة. يعود عدم الوضوح هذا لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، والذي يلزم أن بعض الأزواج من الكمّيات الفيزيائية، مثل الموقع وكمية الحركة أو الطاقة والزمن، ليست مستقلة تماما ولا يمكن تحديدها في نفس الوقت بأعلى من دقة محدّدة. إن هذا المبدأ هو نتيجة طبيعة الأجسام الموجية جزئياً والجسيمية جزئياً في كوننا. فبما أن الموجات هي في طبيعتها أشياء متسعة تشغل منطقة في الفراغ بدلا من نقطة وحيدة، فإن الأجسام في كوننا في طبيعتها ليس لها مواضع محددة.

كلما صغُرت كتلة جسم، قل وضوحه أكثر وزاد عدم اليقين حول موقعه. في حين ستظل النيوكلونات القليلة الوضوح في النواة متصلة مع بعضها البعض لفترة زمنية طويلة جدا، إلا أن هناك احتمالاً صغيراً جدا أن النيوكلونات ستجد نفسها منفصلة عن بعضها لحظيا لمسافة بعيدة عن تأثير القوة النووية. عندها ستصبح النيوكلونات فجأة متحررة عن بعضها البعض، وسيدفعها التنافر الكهروستاتيكي بعيدا عن بعضها في عملية تُسمّى الاضمحلال الإشعاعي. تُسمّى العملية الكمية التي تسمح للنيوكلونات بالهروب من القوة النووية دون أن تتحصل أولا على الطاقة المطلوبة للتغلب على حاجز الطاقة بالنفقية، لأن النيوكلونات تشق فعلياً طريقا نفقيا خلال الحاجز. لقد تعرضنا للنفقية الكمية أول الأمر في القسم ١٢-٢، عندما رأينا أن مسح ذاكرة الفلاش يتطلب أن تشق الإلكترونات طريقا نفقيا خلال حاجز عازل.

إن الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي هو عملية عشوائية تماما. فعلى الرغم من أن نصف تعداد كبير من الأنوية الإشعاعية المتماثلة ستضمحل في زمن محدد، إلا أنك لا يمكنك التنبؤ مقدما حول أي من الأنوية الأصلية ستنجو. وبسبب هذه العشوائية، يصنّف الاضمحلال الإشعاعي ببساطة بزمن عمر النصف - أي الزمن اللازم لاضمحلال نصف الأنوية. فإذا انتظرت عمر نصف ثانياً، ستظل ربع الأنوية الأصلية فقط (نصف النصف)، وبعد عمر نصف ثالث، سيظل ثُـمن فقط (نصف نصف النصف) وهكذا.

إن هذا التنصيف للتعداد مع كل عمر نصف إضافي هو نوع من الاضمحلال الأسي. بالعموم، إن الجزء من الأنوية المتبقي بعد زمن معيّن هو نصف مرفوعاً إلى أس الزمن المنقضي مقسوما على عمر النصف. بكتابتها كمعادلة لفظية، فإن تلك العلاقة هي: (١,١,١٦)

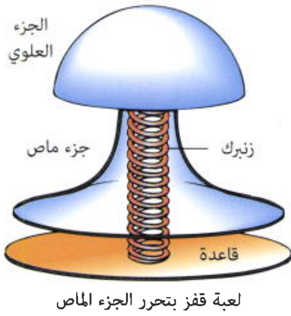
$$\text{الكسر المتبقي} = \left(\frac{١}{٢}\right)^{\text{الزمن المنقضي} / \text{عمر النصف}}$$

ورمزيا:

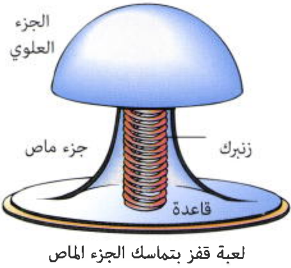
$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t / T_{1/2}}$$

وفي لغة الحياة اليومية: سينقضي النشاط الإشعاعي، لكن عليك أن تنتظر لحين انقضائه.

في حين معظم الأنوية النشطة إشعاعيا لها عمر نصف قصير ولا تظل فترة طويلة في بيئتنا، إلا أن بعضها لها عمر نصف يصل لعدة بلايين من السنين. إنها هذه الأنوية النشطة إشعاعيا، خصوصا أنوية اليورانيوم والثوريوم، هي التي بقت منذ تكوّن الأرض وتظل وفيرة في الطبيعة وساهمت في صناعة الأسلحة النووية.



لعبة قفز بتحرر الجزء الماص



لعبة قفز بتماسك الجزء الماص

شـكل ٤,١,١٦: يندمج زنـبرك وجزء ماص لتشـكيل لعبة تقفز فجأة بعد انتظـار طويل. يحـاول الزنـبرك أن يفصل الجـزء العلوي عـن القاعدة، في حين يحاول الجزء الماص أن يُمسك بالجزئين سـوية. تتحـرّر الطاقة التي قمـت بتخزينهـا في الزنـبرك عندما يسـمح الجزء الماص المـسرّب للهواء بتمدد الزنبرك.

تحقق من فهمك # ٢: من أخفى الطاقة؟ (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

عندما تتفكك نواة كبيرة إلى أجزاء، فإنها تُحرّر كمية كبيرة من الطاقة. على أي شكل تم تخزين تلك الطاقة في النواة السليمة غير المنفصلة؟

دقق في أرقامك #١: إعارة لباس حقيقية (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٥)

جزء صغير من الكربون الموجود في الغلاف الجوي للأرض هو كربون 14، وهو نوع نادر ومُشّع يتم تكوينه بواسطة الأشعة الكونية وله عمر نصف مقداره 5730 سنة. حينما تكون النباتات والحيوانات على قيد الحياة، فإنها تُدخل كربون 14 إلى أنسجتها مع الكربون الاعتيادي، ولكن بمجرد أن تموت، فإن جزءاً من كربون 14 الذي في أنسجتها يبدأ بالتناقص عندما تضمحل أنوية كربون 14. إذا كنت أمين متحف وتبرع شخص ما بلباس يُفترض أن عمره 1001 سنة، فما هو الجزء من الكربون 14 الأصلي الذي تتوقع أن تجده في ذلك اللباس عندما تفحص محتوى الكربون فيه؟

الانشطار والاندماج

كلما زاد عدد البروتونات في نواة، زاد تنافرها مع بعضها البعض وزاد احتمال تسببها في حدوث اضمحلال إشعاعي. إضافة نيوترونات للنواة سيقلل من التنافر البروتوني - البروتوني وذلك بزيادة حجم النواة دون إضافة شحنة موجبة لها. ولكن إضافة الكثير من النيوترونات يجعل الذرة غير مستقرة أيضا لأسباب سنناقشها في القسم القادم. لذا، فإن بناء نواة مستقرة هو عمل توازني دقيق.

في الأنوية التي لها بضعة بروتونات فقط، تنتصر القوة النووية التجاذبية بقوة على القوة الكهروستاتيكية التنافرية وتلتصق النيوكلونات مثل الغراء. تُشابه هذه الأنوية الألعاب القافزة ذات الزنابك الضعيفة والأجزاء الماصة الكبيرة: فما أن تلتصق سوية، فإن الأجزاء لا تنفصل أبدا. في الحقيقة، طاقة الترابط المتوسطة للنيوكلونات (الطاقة المطلوبة لفصلها عن بعضها مقسومة على عدد النيوكلونات) ستزيد إذا كان في هذه الأنوية أعداد أكبر من البروتونات والنيوترونات.

في الأنوية التي لها بروتونات كثيرة، يكون التنافر الكهروستاتيكي قوّياً جدا بحيث لا يمكن للقوة النووية أن تمسك بالنيوكلونات سوية لفترة طويلة. تضمحل هذه الأنوية بسرعة. إنها تُشابه ألعاباً قافزة لها زنابك قوّية وأجزاء ماصة صغيرة. إن طاقة الترابط المتوسطة للنيوكلونات ستزيد إذا كان لهذه الأنوية عدد أقل من البروتونات والنيوترونات.

في الأنوية التي لها 26 بروتوناً تقريباً، بين الطرفين القصويين الذين ناقشناهما للتو، تكون القوة النووية التجاذبية والقوة الكهروستاتيكية التنافرية متوازنة بشكل جيّد. إن هذه الأنوية مستقرة تماما، ولا يمكنك زيادة طاقة الترابط المتوسطة لنيوكلوناتها بإضافة أو إزالة نيوكلونات. يمكن للأنوية الأصغر أن تُحرّر طاقة كامنة بالنمو حتى تصل إلى هذا الحجم المتوسط، في حين أنه يمكن للأنوية الأكبر أن تُحرّر طاقة كامنة بالتقلّص نحو نفس الهدف.

لكي تنمو نواة صغيرة، يجب أن يقوم شيء ما بدفع المزيد من النيوكلونات نحوها. مبدئيا سيعارض التنافر الكهروستاتيكي هذا النمو، ولكن بمجرد أن يتلامس كل شيء، فإن القوة النووية ستربط الجسيمات سوية وتحرّر كمية كبيرة من الطاقة الكامنة. تُسمّى عملية الالتحام هذه الاندماج النووي.

كي تتقلّص نواة كبيرة، يجب أن يقوم شيء ما بفصل أجزائها بعيدا عن سيطرة القوة النووية. عندها سيدفع التنافر الكهروستاتيكي الأجزاء بعيدا عن بعضها ويُحرّر كمية كبيرة من الطاقة الكامنة. تُسمّى عملية الانقسام هذه بالانشطار النووي.

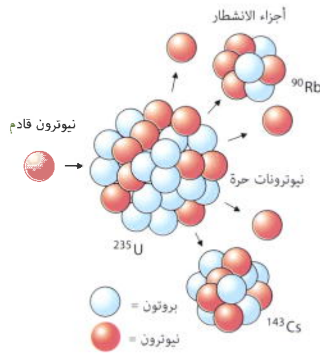
الطاقات المتحررة عندما تخضع الأنوية الصغيرة للاندماج أو عندما تخضع الأنوية الكبيرة للانشطار هائلة جدا بالمقارنة مع الطاقات الكيميائية. تحوّل نواة اليورانيوم، وهي نواة كبيرة، حوالي 0.1 % من كتلتها إلى طاقة عندما تتفكك، وتحوّل نواة الهيدروجين، وهي نواة صغيرة جدا، حوالي 0.3% من كتلتها إلى طاقة عندما تندمج مع أنوية هيدروجين أخرى. بمقارنة الكيلوجرام مع الكيلوجرام، تحرر التفاعلات النووية حوالي 10 مليون أضعاف طاقة التفاعلات الكيميائية، ومن حسن الحظ أن بدء التفاعلات النووية أصعب بكثير.

بتلك الخلفية العلمية، لنتبع تسلسلاً من الاكتشافات قريبا من بدء القرن العشرين الميلادي. تم اكتشاف الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي بالخطأ من قِبل الفيزيائي الفرنسي انطوان هنري بيكاريل (١٨٥٢-١٩٠٨م) في عام ١٨٩٦م. فنتيجة فضوله بالاكتشاف الحديث لأشعة إكس، بدأ بيكاريل بالبحث عن مواد يمكنها أن تبعث أشعة إكس بعد تعرضها للضوء. ما أدهشه هو أنه وجد أن اليورانيوم جعل الألواح الفوتوغرافية ضبابية، حتى من خلال غطاء معتم وحتى دون أي تعرّض للضوء. تم تأكيد اكتشافه والتوسع فيه من قِبل الفيزيائية الفرنسية ذات الأصل البولندي ماري كوري (١٨٦٧ - ١٩٣٤م) والكيميائي الفرنسي بيير كوري (١٨٥٩ - ١٩٠٦م). هذا الفريق من الزوج والزوجة اكتشف العديد من العناصر الجديدة المشعّة، بما في ذلك البولونيوم (نسبة لمسقط رأس ماري) والراديوم.

في عام ١٩١١م، اكتشف الفيزيائي البريطاني ارنست رذرفورد (١٨٧١ - ١٩٣٧م) أن الذرات لها أنوية. وتباعا لذلك وجد رذرفورد أن الأنوية في بعض الأحيان تتفكك عند اصطدامها بأنوية هيليوم عالية الطاقة. وفي عام ١٩٣٢، اكتشف الفيزيائي البريطاني جيمز تشادويك (١٨٩١ - ١٩٧٤م) جزءاً من النواة، وهو النيوترون، والذي

٥[1] انتقلت الفيزيائية ليز مايتنر المولودة في النمسا إلى برلين في عام ١٩٠٧م وبدأت بتعاون دام ثلاثين عاماً مع الكيميائي أوتو هان. في عام ١٩٣٤م، أقنعت هان بالانضمام معها لدراسة العمليات النووية وحققا إنجازات عظيمة. من المؤسف أن أصل مايتنر اليهودي جعلها هدفاً للقيود الأكاديمية التي وضعتها النازية فهربت إلى السويد في عام ١٩٣٨م. استمرت مايتنر في توجيه تعاونهما من خلال الرسائل. بعد بضعة أشهر فقط بعد مغادرتها، وجد هان ومساعده فريتز ستراسمان أن التشعيع النيوتروني للعناصر الثقيلة يكوّن أنوية أصغر بدلا من أكبر. بعد ذلك بقليل طورّت مايتنر وقريبها أوتو فريش نموذجا للانشطار النووي بناء على تلك القياسات. لكن هان نشر النتائج دون ذكر اسم ماتينر في البحث، ظاهريا لتجنب التدخل النازي. نتيجة لهذا الحذف، تم إعطاء جائزة نوبل للكيمياء في عام ١٩٤٤م لهان وحده. استمر هان بزعم أن مايتنر كانت مجرد مساعدته، بدلا من قائدة مجهوداتهم المجتمعة. اعترافا بهذا الظلم العظيم، تم تسمية العنصر ١٠٩ بماتينريم في عام ١٩٩٤م.

ليس له أي شحنة كهربائية وبالتالي يمكنه أن يقترب من النواة دون أي تنافر كهروستاتيكي. وبعد وقت قصير تم اكتشاف أن النيوترونات تلتصق بأنوية العديد من الذرات.



شكل ٥,١,١٦: عندما يصطدم نيوترون بنواة اليورانيوم، هناك احتمال كبير أن النواة ستتفكك لأجزاء. تُسمّى هذه العملية الانشطار المستحث. من ضمن أجزاء الانشطار المستحث نيوترونات أخرى.

لكن الاكتشاف الخطير والذي جعل من القنبلة الذرية ممكنة هو انشطار الأنوية المستحث بالنيوترون. في عام ١٩٣٤، مكان الفيزيائي الإيطالي انريكو فيرمي (١٩٠١ - ١٩٥٤م) وزملاؤه يحاولون حل لغز معين حول النواة، وهي عملية اضمحلال إشعاعي تُسمّى اضمحلال بيتا. كانوا يضيفون نيوترونات لأنوية كل ذرة يتحصلون عليها، وعندما أضافوا نيوترونات إلى اليورانيوم- بنواته الضخمة- لاحظوا إنتاج بعض الأنظمة الإشعاعية ذات العمر القصير جدا، فظنوا أنهم قد كوّنوا أنوية ثقيلة جداً وذهبوا إلى حد إعطاء هذه العناصر الجديدة أسماء مؤقتة.

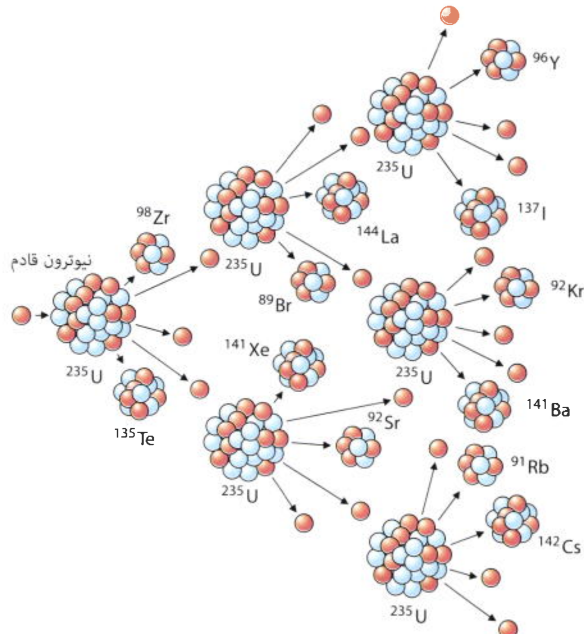
لكن بعد أربع سنوات، قام كل من الفيزيائية النمساوية ليز مايتنر (١٨٧٨ - ١٩٦٨م) (انظر ٥') والفيزيائي النمساوي أوتو فريش (١٩٠٤ - ١٩٧٩م) والكيميائيين الألمانيين أوتو هان (١٨٧٩ - ١٩٦٨م) وفريتز ستراسمان (١٩٠٢ - ١٩٨٠م) سوية بتوضيح أن ما قامت به مجموعة فيرمي هو في الواقع تقسيم اليورانيوم إلى أنوية أخف (شكل ١٦,١,٥). إن العديد من الأجزاء المتكوّنة بهذا الانشطار المُستحث كانت نيوترونات، والتي بذاتها يمكنها أن تتسبب في تدمير أنوية يورانيوم أخرى.

تحقق من فهمك # ٣: مشكلة نووية لزجة (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

إذا أخذت نواتين متوسطة الحجم ودمجتهما مع بعضهما لتكوين نواة يورانيوم واحدة، هل ستحرر هذه العملية طاقة أم تستهلكها؟

التفاعلات التسلسلية والقنبلة الانشطارية

أدرك الفيزيائيون بسرعة أن التفاعل التسلسلي ممكن، وهو تفاعل يحُثّ فيه انشطار نواة يورانيوم واحدة انشطاراً في نواتي يورانيوم مجاورتين، والذي بدوره سيقوم بحثّ انشطار في أربعة أنوية يورانيوم أخرى، وهكذا (شكل ٦,١,١٦). النتيجة ستكون عملية نووية كارثية يتم فيها تشتت العديد أو معظم الأنوية في قطعة يورانيوم وتحرّر كميات هائلة من الطاقة.



شكل ٦,١,١٦: يحدث التفاعل التسلسلي عندما تحث أجزاء إحدى الأنوية المنشطرة انشطاراً في نواة واحدة إضافية على الأقل. مثل هذا التفاعل المتسلسل سهل على وجه الخصوص في 235U، النظير الخفيف لليورانيوم، حيث تُحرر كل نواة منشطرة 2.5 نيوتروناً في المتوسط.

بمعنى، كان العمل المتبقي نحو كل من القنبلة النووية والقنبلة الهيدروجينية مجرد تفاصيل تقنية. كان يجب أن تُحقق أربعة شروط فقط لكي تكون القنبلة الذرية أو القنبلة الانشطارية ممكنة:

١. يجب أن يوجد مصدر للنيوترونات في القنبلة لإثارة الانفجار.
٢. يجب أن تكون الأنوية التي تكوّن القنبلة قابلة للانشطار، أي يجب أن تنشطر عندما يصطدم نيوترون بها.
٣. يجب أن يُنتج كل انشطار مستحث نيوترونات أكثر من التي يستهلكها.
٤. يجب أن تستخدم القنبلة النيوترونات المتحررة بكفاءة بحيث يستحث كل انشطار بالمتوسط أكثر من انشطار لاحق واحد.

كان تحقيق الشرط الأول سهلا. تبعث العديد من العناصر الإشعاعية نيوترونات، ولكن تحقيق الشرطين الثاني والثالث كان أكثر صعوبة. هنا يدخل اليورانيوم في الصورة، فلقد كان معروفاً أنه قابل للانشطار، وكان معروفا أنه يحرّر نيوترونات أكثر من التي يستهلكها.

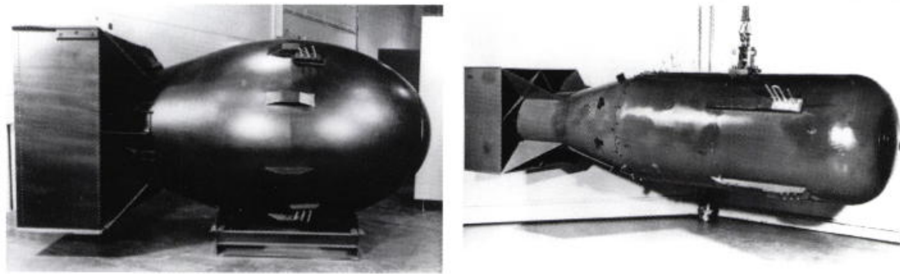
لكن ليس كل أنوية اليورانيوم متماثلة. ففي حين يجب أن تحتوي نواة اليورانيوم على ٩٢ بروتوناً، بحيث تكوّن ذرة متعادلة بها 92 إلكتروناً ولها جميع الخواص الكيميائية لليورانيوم (U في الشكل ٤,٢,١٤)، إلا أن عدد النيوترونات في تلك النواة مرن بعض الشيء. تُسمّى الأنوية التي تختلف فقط في عدد النيوترونات التي تحتويها بالنظائر، ويأتي اليورانيوم الطبيعي في هيئة نظيرين: ^{235}U و ^{238}U، حيث يدل العدد الموجود في رمز العنصر على عدد النيوكلونات في كل نواة. تحتوي النواة 235U على 92 بروتوناً و 143 نيوتروناً، لمجموع من 235 نيوكلوناً. على النقيض، تحتوي نواة ^{238}U على 238 نيوكلوناً – 92 بروتوناً و146 نيوتروناً.

يتبين أن ^{235}U فقط هو المناسب في صناعة قنبلة. فهو شبه مستقر، بوجود عدد من البروتونات أكثر مما تستطيع القوة النووية أن تُمسك بها سوية، حتى مع التأثير التخفيفي بوجود 143 نيوتروناً. ومثل العديد من الأنوية الغنية بالبروتونات، يخضع ^{235}U في نهاية الأمر لاضمحلال ألفا – يبعث نواة هيليوم (^4He) وبالتالي يفقد بروتونين ونيترونين. لليورانيوم ^{235}U عمر نصف إشعاعي مقداره 710 مليون سنة. لكن عند اصطدامه بنيوترون، يتفكك ^{235}U فورا إلى أجزاء ويحرر هذا الانشطار المستحث حوالي 2.5 نيوتروناً.

اليورانيوم ^{238}U هو أكثر استقراراً من النظير الأخف نوعاً ما، وعمر النصف له هو 4.51 بليون سنة، ولكن هذه النواة تمتص معظم النيوترونات دون أن تخضع للانشطار. وبدلا من ذلك، تخضع النواة لسلسلة من التغيرات النووية المعقدة والتي في نهاية الأمر تحوّلها إلى بلوتونيوم، وهو عنصر غير موجود في الطبيعة. يصبح هذا البلوتونيوم ^{239}Pu، نواة بها 94 بروتوناً و145 نيوتروناً. وكما سنرى لاحقا، البلوتونيوم ذاته مفيد في صناعة الأسلحة النووية.

في الحقيقية إن ^{238}U يبطئ التفاعل التسلسلي بدلا من أن يحفزه. وبما أن ^{235}U فقط هو القادر على دعم التفاعل التسلسلي، فإنه كان يجب أن يُفصل اليورانيوم الطبيعي قبل أن يُتمكّن من استخدامه في القنبلة، ولكن ^{235}U نادر جدا. تكوّنت خزينة الأرض من أنوية اليورانيوم منذ زمن طويل عند انفجار نجم ميت، حيث سخّنت السوبر نوفا أنوية الذرات الأصغر لحرارة عالية جعلتها تصطدم سوية وتلتصق، وبهذا تكونت أنوية اليورانيوم، محصورة في داخلها طاقة السوبر نوفا. تم إدخال هذه الأنوية إلى الأرض أثناء تكوّنها قبل حوالي 4 أو 5 بلايين سنة، وهي تضمحل منذ ذلك الوقت. إن نظائر اليورانيوم الوحيدة التي ظلّت بأي مقدار هما ^{235}U و^{238}U. وبما أن ^{235}U هو أقل استقرارًا، فإنه تضاءل إلى 0.72٪ فقط من أنوية اليورانيوم. إن الـ 99٪ من اليورانيوم المتبقي هو ^{238}U.
إن فصل ^{235}U من ^{238}U صعب جدا. فبما أن الذرات التي تحتوي تلك الأنوية تختلف فقط في الكتلة، وليس في الكيمياء، فلا يمكن فصلها إلا بطرق تقارن بين كتلتيهما. بما أن الفرق في الكتلة صغير جدا، فالمطلوب إجراءات بطولية لفصل ^{235}U من اليورانيوم الطبيعي. أثناء الحرب العالمية الثانية وحقبة الحرب الباردة، طوّرت الحكومة الأمريكية مرافق ضخمة

بإذن من مصلحة الطاقة الأمريكية

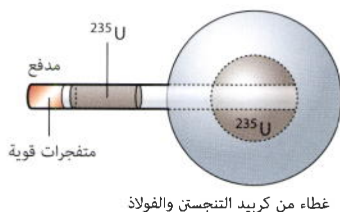


شكل ٧,١,١٦: استخدمت قنبلة «الطفل الصغير» (يسار) مدفعا لإطلاق أسطوانة من اليورانيوم لداخل كرة غير مكتملة من اليورانيوم. استخدمت قنبلة «الرجل البدين» (يمين) متفجرات قوّية لسحق كرة من البلوتونيوم لكثافة عالية جدا. دمّر «الطفل الصغير» مدينة هيروشيما، بينما دمّر «الرجل البدين» مدينة نجازاكي.

لفصل نظيري اليورانيوم. إن الحاجة لمثل هذه التجهيزات هي أحد العوائق الكبيرة أمام انتشار الأسلحة النووية.

الشرط الأخير للمحافظة على التفاعل التسلسلي هو أن القنبلة يجب أن تستخدم النيوترونات بكفاءة، بحيث أن كل انشطار يحث بالمتوسط أكثر من انشطار واحد لاحق. هذا يعني أن محتويات القنبلة لا يمكنها أن تمتص نيوترونات بشكل مهدر، ولا يمكنها أن تدع الكثير منها تهرب دون تسبب انشطار. إن كتلة من الـ ^{235}U النقية نسبياً لن تمتص نيوترونات بشكل مهدر، لكنها قد تسمح للعديد منها بالهروب من خلال سطحها. لكي يحدث تفاعل متسلسل، يجب أن تكون الكتلة كبيرة بما يكفي بحيث يكون لكل نيوترون احتمال جيّد للاصطدام بنواة أخرى قبل أن يغادر الكتلة، ويجب أيضا أن يكون للكتلة مقدار أدنى من المساحة السطحية، أي يجب أن تكون كروية.

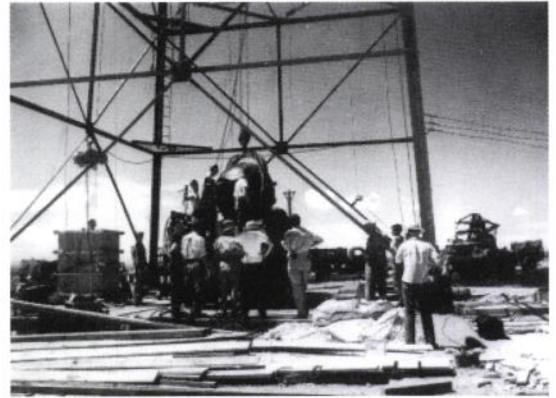
لكن ما مقدار كبر الحجم الذي يجب أن تكون عليه الكرة؟ بما أن الذرات معظمها فراغ، فإن النيوترون يمكنه أن يسير عدة سنتيمترات خلال كتلة اليورانيوم دون أن يصطدم بنواة. وبالتالي فإن كرة لها حجم كرة الغولف من اليورانيوم ستسمح للكثير من النيوترونات بالهروب. لكرة مكشوفة من ^{235}U، تكون الكتلة الحرجة المطلوبة لبدء تفاعل متسلسل هي حوالي 52 kg (115lbm)، أي كرة قطرها 17cm (7in تقريبًا). عند ذلك، كل انشطار سيحث في المتوسط انشطارا واحد لاحقا. ولكن لتفاعل تسلسلي انفجاري، والذي يحث فيه كل انشطار أكثر بكثير من انشطار واحد في المتوسط، يتطلب المزيد من ^{235}U: كتلة فوق حرجة. سيقوم بالمهمة حوالي 60kg (132lbm).



شكل ٨,١,١٦: كان المبدأ الذي استندت عليه قنبلة «الطفل الصغير» بسيطاً: تم قسم كرة من ^{235}U إلى جزئين بحيث لم يُشكّل أي منهما كتلة حرجة بذاته. أحد الجزئين كان كرة مجوّفة، والجزء الآخر كان أسطوانة تُكمل الكرة. عندما تم تفجير القنبلة، أطلق مدفع الأسطوانة إلى الكرة المجوّفة، مكونا بذلك كتلة حرجة جداً وبادئاً تفاعلاً تسلسلياً انفجارياً.

مع حلول عام 1945، كان العلماء والمهندسون في مشروع مانهاتن قد وجدوا طرقاً لتحقيق هذه الشروط الأربعة وكانوا على استعداد لبدء تفاعل تسلسلي انفجاري. كانوا قد تمكّنوا من تجميع كمية كافية من ^{235}U لتكوين كتلة فوق حرجة، وكان سيتم وضع قطع مشكّلة بعناية من ^{235}U في القنبلة بحيث تنضم سوية في اللحظة التي ستنفجر فيها القنبلة. فعندما تصل الكتلة إلى الكتلة الحرجة، فإن بعض النيوترونات المبدئية ستُبدئ التفاعل التسلسلي، وعندما أصبحت كتلة اليورانيوم فوق حرجة، فإن انشطارا كارثيا سيحوّلها بسرعة إلى كرة ضخمة من النار.

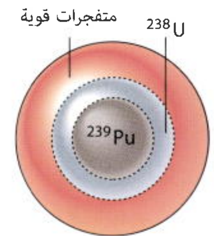
لكن التجميع كان دقيقا ومتطلبا لبراعة. كان على الكتلة فوق الحرجة أن تُجمّع بالكامل قبل أن يكون قد مرّ زمن طويل على بدء التفاعل التسلسلي؛ وإلا ستبدأ القنبلة بالتسخين أكثر مما يجب وتنفجر قبل أن يتمكن عدد كاف من أنويتها من الانشطار. في اليورانيوم ^{235}U النقي، يكون الزمن الذي يستغرقه انشطار واحد لحثّ انشطار تالٍ هو حوالي 10ns فقط (10 نانوثانية أو 10 جزء من البليون من الثانية). وفي الكتلة فوق الحرجة، يكون كل جيل من الانشطارات أكبر من الجيل السابق، فيتطلب بضعة درزينة فقط من الأجيال لتحطيم نسبة لا بأس بها من أنوية اليورانيوم. ينتهي كل التفاعل التسلسلي الانفجاري في أقل من جزء من مليون من الثانية، ومعظم الطاقة المتحررة تكون في البضعة أجيال الأخيرة (حوالي 30ns).



شكل ٩,١,١٦: فُجّرت القنبلة الذرية الأولى، الملقبة بـ«الأداة» (The Gadget)، على برج في موقع صحراوي بعيد بالقرب من ألاموغوردو، في ولاية نيو مكسيكو، في ١٦ يونيو عام ١٩٤٥. يظهر في الصورة موظفو مشروع مانهاتن السرّي يرفعون أجزاء من قنبلة البلوتونيوم على البرج قبل الانفجار.

بإذن من معامل لوس الوموس العلمية بجامعة كاليفورنيا

للتأكد من أن التجميع قد اكتمل قبل أن تنفجر القنبلة، كان يجب أن يتم بسرعة غير اعتيادية. في القنبلة ^{235}U والمسماة «الطفل الصغير» (شكل ٧,١,١٦)، والتي تفجّرت فوق مدينة هيروشيما في أغسطس ٦ عام ١٩٤٥ في الساعة ٨:١٥ صباحا والمسؤولة عن قتل حوالي ٢٠٠,٠٠٠ مواطن ياباني، تم تجميع الكتلة فوق الحرجة عندما أطلق مدفع أسطوانة من ^{235}U خلال ثقب في كرة من ^{235}U (شكل ٨,١,١٦)، وعندما تمركزت الأسطوانة في الثقب، كانت قد اكتملت كرة كتلتها 60kg من اليورانيوم، محتواة في وعاء من كاربيد التنجستن والفولاذ. حصر هذا الوعاء اليورانيوم، ممسكا به سوية بواسطة قصوره بينما بدأ الانفجار، وبدأ تفاعل تسلسلي انفجاري فورا، وفي الزمن الذي فجّر فيه اليورانيوم نفسه، كانت 1.3 % من أنوية ^{235}U قد انشطرت. لقد كانت الطاقة المتحررة في ذاك الحدث تساوي انفجار 15,000 طن من مادة TNT المتفجّرة تقريبا.



شكل ١٠,١,١٦: كان المفهوم المستخدم في «الأداة» و«الرجل البدين» معقدا نسبيا. المتفجّرات القوّية المشكّلة بعناية سحقت كرة بحجم كرة البيسبول من ^{239}Pu داخل غطاء من ^{238}U عاكس للنيوترونات. تم ضغط البلوتونيوم لكثافة عالية وبسرعة وصل للكتلة فوق الحرجة، بادئاً بذلك تفاعلا تسلسليا انفجاريا.

لكن «الطفل الصغير» كان في الواقع الانفجار النووي الثاني. كان مفهومه مضمونا وكان ^{235}U نفيساً جدا بحيث أُسقط «الطفل الصغير» دون أن يتم اختباره على الإطلاق. ولكن كان مشروع مانهاتن قد طوّر أيضاً قنبلة مستندة على البلوتونيوم والتي تضمنت مفهوماً أكثر تعقيدا. لقد كان التأكد من عمل هذه القنبلة أقل، لذا تم تجربتها مرة واحدة قبل استخدامها.

لم تستخدم القنبلة الذرية الأولى والملقبة «بالأداة» ^{235}U. وبدلا من ذلك، استخدمت البلوتونيوم الذي تم تصنيعه من ^{238}U في مفاعلات نووية، حيث يقوم المفاعل النووي بإجراء تفاعل تسلسلي مقيّد في اليورانيوم، والنيوترونات من هذا التفاعل التسلسلي يمكنها أن تحوّل ^{238}U إلى ^{239}Pu.

مثل ^{235}U، يُحقق ^{239}Pu شروط القنبلة. نواة ^{239}Pu غير مستقرة نسبيا، بعمر نصف مقداره 24,400 سنة فقط. ينشطر البلوتونيوم بسهولة عند ارتطامه بنيوترون ويُحرّر في المتوسط 3 نيوترونات عند ذلك. وبالتالي يمكن استخدام ^{239}Pu في تفاعل تسلسلي. بالنسبة لكرة مكشوفة من ^{239}Pu، فإن الكتلة الحرجة هي حوالي 10kg (22lbm) - أي كرة قطرها حوالي 10cm (4in).

لكن هناك مشكلة في ^{239}Pu. فهو نشط جدا إشعاعيا ويحرّر الكثير من النيوترونات عند انشطاره بحيث يتطوّر تفاعل تسلسلي مباشرة تقريباً. هناك زمن أقل بكثير لتجميع كتلة فوق حرجة من البلوتونيوم مقارنة باليورانيوم، فلن تنجح طريقة التجميع المدفعية لأن البلوتونيوم سيسخن أكثر من اللازم وسيُفجّر نفسه قبل أن تدخل الأسطوانة بالكامل على الكرة.

لذا، تم استخدام طريقة تجميع أكثر تعقيدا. عندما تم تفجير «الأداة» (شكل ٩,١,١٦) في ألاموغوردو في ١٦ يونيو عام ١٩٤٥ عند الساعة ٥:٢٩ صباحا، حطمت أكثر من 2000kg (4400lbm) من المتفجرات المصممة بعناية أو فجّرت داخليا كرة من البلوتونيوم (شكل ١٠,١,١٦). وحدها، لم تكن الكرة ذات الكتلة

6.1kg (13.4lbm) كبيرة بما يكفي لتكون كتلة حرجة؛ كانت كتلة دون حرجة. لكنها كانت مُحاطة بغطاء محيط من ^{238}U تعكس أنويته الضخمة العديد من النيوترونات عائدة إلى البلوتونيوم مثل كريات البلية المرتدة من على كرات البولنج. وضغطت عملية الانفجار الداخلي البلوتونيوم بكثافة أعلى من كثافته الطبيعية. وبضغط أنوية البلوتونيوم سوية بإحكام أكبر، زادت احتمالية أن يصطدم بها نيوترون وتخضع لانشطار.

نجحت هذه الطريقة، فقد تسبب التفاعل التسلسلي الذي تلا العملية في انشطار 17 ٪ من أنوية البلوتونيوم وحرّر طاقة تُكافئ انفجار 22,000 طن من مادة TNT المتفجّرة. اختفى البرج والمعدّات الموجودة في موقع ترينيتي تماما في بخار، وتحوّلت رمال الصحراء إلى زجاج لمئات من الأمتار في جميع الاتجاهات. تم إسقاط قنبلة مماثلة تقريباً تُسمّى «الرجل البدين» (شكل ٧,١,١٦) فوق مدينة نجازاكي في ٩ أغسطس عام ١٩٤٥، عند الساعة ١١:٠٢ صباحا، حيث قتلت حوالي 140,000 شخص تقريبا.

في السنوات التي تلت القنابل الانشطارية الأولى، كان تركيز التطوير في كيفية إحضار المواد القابلة للانشطار سوية. كلما زاد زمن إبقاء الكتلة فوق الحرجة سوية مع بعضها قبل أن تسخن وتنفجر، زادت نسبة أنويتها التي يمكن أن تنشطر وزاد نتاج الانفجار. إن تقنية التحطيم في «الأداة» و«الرجل البدين» أصبحت قياسية، وأصبحت القنابل أقل حجما وأكثر كفاءة في استخدام وقودها النووي. لقد قللت عملية الانفجار الداخلي من مقدار البلوتونيوم المطلوب للوصول إلى الكتلة فوق الحرجة، بحيث أصبحت القنابل الانشطارية الصغيرة جدا ممكنة. إن أصغر قنبلة ذرية، المسماة «ديفي كروكت»، وزنت فقط 220N (50lbf) تقريبا.

تحقق من فهمك # ٤: دغدغة ذيل التنين (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

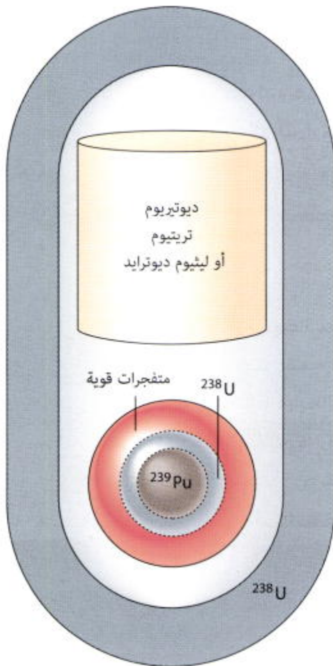
ماذا سيحدث إذا حرّكت ببطء نصفي كرة من ^{235}U كتلة كل منهما 30kg (66lbm) لتكوين كرة واحدة؟

الاندماج أو القنبلة الهيدروجينية

بما أن المواد القابلة للانشطار تبدأ بالانفجار بمجرد أن تزيد كتلتها عن الكتلة الحرجة، فإن هذه الكتلة الحرجة تحُدّ من حجم وقدرة النتاج الانفجاري للقنبلة الانشطارية. وفي محاولة للبحث عن طريقة حول هذه المحدودية، أعاد علماء القنابل النظر في الأنوية الصغيرة وحاولوا التفكير في كيفية استخلاص طاقة عن طريق إلصاقها سوية مع بعضها البعض.

أحضرت القنبلة الانشطارية إلى الأرض، لأول مرة، درجات حرارة لم تُشاهد من قبل إلا في النجوم. تتحصّل النجوم على معظم طاقتها عن طريق دمج أنوية الهيدروجين سوية لتكوين أنوية هيليوم، وهي عملية تُحرّر طاقة هائلة جدا. وبما أن أنوية الهيدروجين هي بروتونات وتتنافر مع بعضها البعض بقوة كبيرة جدا، فإن الهيدروجين في العادة لا يخضع لاندماج هنا على الأرض. ولإحداث اندماج، لا بد أن يقوم شيء ما بإحضار هذه البروتونات بالقرب من بعضها بما يكفي لأن تقوم القوة النووية بإلصاقها مع بعضها. والطريقة الوحيدة العملية التي نعرفها لإحضار الأنوية سوية هي أن نسخّنها لدرجة أنها تصطدم مع بعضها البعض، وهذا ما يحدث في القنبلة الاندماجية، وتُسمّى أيضا القنبلة النووية الحرارية أو الهيدروجينية.

في القنبلة الاندماجية، تُسخّن قنبلة انشطارية منفجرة كمية من الهيدروجين لحوالي 100 مليون درجة مئوية (شكل ١١,١,١٦). وعند درجة الحرارة تلك، تبدأ أنوية الهيدروجين بالتصادم مع بعضها البعض. لتخفيف عملية الاندماج النووي، تُستخدم النظائر الثقيلة للهيدروجين: ديوتيريوم (^{2}H) والتريتيوم (^{3}H). في حين تحتوي نواة الهيدروجين الطبيعية (^{1}H) على بروتون واحد فقط، إلا أن نواة الديوتيريوم تحتوي على بروتون ونيوترون. تحتوي نواة التريتيوم على بروتون ونيوترونين. وعندما تصطدم نواة الديوتيريوم بنواة التريتيوم،



شكل ١١,١,١٦: تحرّر قنبلة الاندماج طاقة بدمج أنوية ديوتيريوم (^{2}H) وتريتيوم (^{3}H) سوية لتكوين هيليوم (^{4}He) ونيوترونات. يبدأ هذا الاندماج بتسخين الهيدروجين لأكثر من 100 مليون درجة مئوية عن طريق قنبلة انشطارية. بعد ذلك تحثّ النيوترونات ذات الطاقة العالية المتحررة من عملية الاندماج عملية انشطار في الغطاء المحيط من ^{238}U، محرّرة بذلك مزيدا من الطاقة. يُنتج الليثيوم (^{6}Li) التريتيوم عند تعرضه لنيوترونات.

فإنهما تلتصقان مع بعضها لتكوين نواة الهيليوم (^4He) ونيوترون حر، ولأن هذه العملية تحوّل حوالي 0.3 % من الكتلة الأصلية إلى طاقة، فإن نواة الهيليوم والنيوترون ستتباعدان بعيدا عن بعضهما بسرعات عالية.

بما أن الهيدروجين لن ينفجر تلقائيا، حتى في كميات كبيرة جدا، فإن القنبلة الهيدروجينية يمكن أن تكون كبيرة جدا، وتستخدم قنبلة انشطارية لبدء انفجارها، ولكن بعد ذلك لا شيء يحُدّها. بُنيت بعض القنابل الاندماجية الضخمة وتم تجربتها أثناء الأيام الأولى للحرب الباردة. في العادة احتوت هذه القنابل على بادئ انشطاري وتابع هيدروجيني، وجميعها محاطة بغطاء من ^{238}U. يحصر الغطاء الهيدروجين عند بدء الاندماج، وما أن يبدأ الاندماج، ويتحوّل الديوتيريوم والتريتيوم إلى هيليوم ونيوترونات، إلا وتصطدم النيوترونات بأنوية ^{238}U في الغطاء. كانت نيوترونات الاندماج هذه ذات طاقة عالية بحيث أنها كانت قادرة على حثّ انشطارات حتى في أنوية ^{238}U وتحرير المزيد من الطاقة. إجمالا، يُسمّى هذا التركيب أحيانا بقنبلة الانشطار - الاندماج - الانشطار.

شكل آخر لهذه القنبلة يُسمّى بالقنبلة النيوترونية أو الإشعاع المعزّز. ليس لتلك القنبلة غطاء محيط من ^{238}U بحيث تسير النيوترونات ذات الطاقة العالية الناتجة من عملية الاندماج بعيدا عن الانفجار، وتُشعّع كل شيء في المحيط. إن هذه القنبلة خطرة على البشر ولكنها ليست مدمّرة كثيراً للأملاك.

التريتيوم هو نظير مشعّ يتكوّن في المفاعلات النووية، وله الكثير من النيوترونات مما يمنع نواته من الاستقرار ويضمحل ببطء إلى نظير أخف من الهيليوم (4He). ولأن التريتيوم له عمر نصف مقداره 12.3 سنة، فإن قنابل الاندماج المحتوية على التريتيوم تتطلب صيانة دورية لسد نقص التريتيوم بها.

تستخدم العديد من القنابل الاندماجية ليثيوم ديوترايد صلباً بدلا من غازات الديوتيريوم والتريتيوم. إن الليثيوم ديوترايد هو ملح يحتوي على الليثيوم (^6Li) والديوتيريوم (^2H). وعندما يصطدم نيوترون من البادئ الانشطاري بنواة ^6Li، فإنهما يتفككان إلى نواة هيليوم (^4He) ونواة تريتيوم (^3H). وفي القنبلة، يتحوّل الليثيوم ديوترايد سريعا إلى مزيج من الديوتيريوم والتريتيوم والهيليوم، والذي يخضع بعد ذلك لاندماج.

تحقق من فهمك # ٥: من الصعب الاجتماع سوية (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

لماذا يجب تسخين الهيدروجين لدرجات حرارة عالية جدا لكي يبدأ الاندماج؟

الحرارة والإشعاع ونتاج الانفجار النووي

بعد أن ينفجر سلاح نووي - أي بعد أن تنشطر مادته القابلة للانشطار وتندمج مادته القابلة للاندماج - ماذا يحدث بعد ذلك؟ أولا: تخرج أعداد هائلة من الأنوية والجسيمات دون الذرية من الانفجار بسرعات هائلة، والعديد منها بسرعة الضوء تقريباً. تصطدم هذه الجسيمات بذرات وجزيئات مجاورة، فتسخنها لدرجات حرارة عالية جدا وتنتج كرة محلية من النار حول القنبلة ذاتها. كما أنها تسبب ضرراً إشعاعياً واسعاً في المنطقة المحيطة.

ثانيا: تخرج ومضة ضوئية من الانفجار، جزء من سببها عمليات الانشطار والاندماج ذاتها والجزء الآخر بسبب كرة النار الفائقة الحرارة التي تتبع الانفجار. هذا الضوء ليس مجرد ضوءا مرئيا، بل أيضا يحتوي على كل جزء من الطيف الكهرومغنطيسي من تحت الأحمر إلى المرئي إلى فوق البنفسجي إلى أشعة إكس إلى أشعة جاما، ويحرق هذا الضوء الأشياء المجاورة من الداخل والخارج.
ثالثا، يكوّن الانفجار موجة ضغط هائلة في الهواء حول كرة النار. تنتشر موجة صدمية للخارج من كرة النار بسرعة الصوت، فتُسقط كل شيء في مسارها لمسافات طويلة. رابعا، يندفع الهواء المتخلخل والفائق الحرارة للأعلى، مرفوعاً بواسطة قوى طفو، لتكوين سحابة عظيمة على شكل الفطر.

لكن أكثر تداعيات الانفجار النووي مكرا هو نتاج الانفجار النووي، أي تكوين وتحرير أنوية مشعة. يحوّل الانشطار أنوية اليورانيوم والبلوتونيوم إلى أنوية أصغر. وكل نواة جديدة لها عدة درزينات من البروتونات ونصيبها من النيوترونات من النواة المنشطرة. تجذب هذه الأنوية الجديدة الإلكترونات وتُصبح ظاهريا ذرات طبيعية مثل اليود أو الكوبالت. لكن في حين تحتاج الأنوية الأكبر مثل اليورانيوم إلى نيوترونات إضافية لتخفيف بروتوناتها وتقليل تنافراتها الكهروستاتيكية، نجد أن الأنوية المتوسطة والصغيرة مثل اليود والكوبالت لا تحتاج الكثير من النيوترونات. ينتهي المطاف بالأنوية الجديدة باحتوائها على الكثير من النيوترونات وتصبح مشعّة، ولها أعمار نصف ما بين جزء من ألف من الثانية إلى آلاف السنوات.

إلى أن تضمحل، لا يمكن تمييز الذرات التي تحتوي على هذه الأنوية عن الذرات الطبيعية. فهي نظائر مشعّة لذرات مألوفة، وأجسامنا تُدخلها بسذاجة إلى أنسجتنا، وتظل هذه النظائر في الأغشية، وتقوم بأي مهمة كيميائية يطلبها جسمنا منها، ولكن في نهاية الأمر تتفكك هذه الذرات المشعّة وتحرّر طاقة نووية. ولأن كل اضمحلال إشعاعي يحدث بالقرب منّا أو في داخلنا يحرّر طاقة قد تكون أكبر بمليون مرة من الموجودة في الروابط الكيميائية، فإن هذه الاضمحلالات تتسبب في تغيرات كيميائية في خلايا جسمنا، حيث يمكنها أن تقتل خلايا أو تتلف المعلومات الجينية للخلية، مسببة بذلك سرطان.

يحدث تحويل العناصر هذا- أي إعادة تركيب الأنوية لتحويل ذرات عنصر واحد إلى آخر - بطريقة غير منضبطة في الأسلحة النووية ويُنتج مزيجاً قاتلاً من النظائر غير المستقرة. تستغرق هذه النظائر سنوات لكي تضمحل خارج البيئة وكل ما نستطيع فعله هو الانتظار. حتى الأسلحة النووية التي لها نتاج انفجاري قليل، وهي ما تُسمّى بالقنابل القذرة، يمكنها أن تكسو الأراضي المحيطة بحطام إشعاعي. تنتج المفاعلات النووية أمزجة مماثلة من النظائر المشعّة في مجمّع وقودها وتركيب قالبها، ولهذا يظل التخلّص من الوقود النووي المستنفد مشكلة كبيرة.

على الجانب الآخر، أصبحت النظائر المشعة منحة في الطب والكيمياء الحيوية، حيث وجدت العديد منها تطبيقات نافعة ومنقذة للحياة البشرية. وعلاوة على ذلك، يمكن تحويل عناصر بشكل منتظم، تحت ظروف منضبطة، لتوليد نظائر مرغوب فيها بدلا من تشكيلة عشوائية، ولكن مثل هذا التحويل صعب ومكلف ماديا، ويتضمّن عمليات نووية بدلا من كيميائية. على الرغم من أن حلم الكيميائيين في تحويل الرصاص إلى ذهب أصبح ممكنا أخيرا، إلا أنه ليس طريقا للثراء.

معتقدات خاطئة شائعة: الإشعاع والإشعاعية

المعتقد الخاطئ:

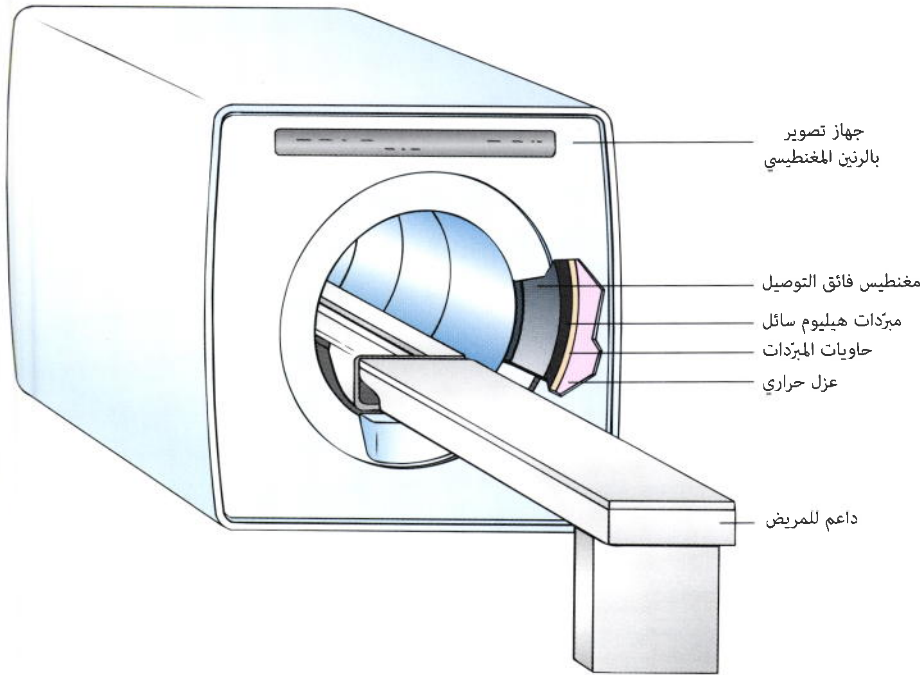
عندما تتعرّض مادة مثل الطعام لأشعة مايكروويف أو موجات راديو أو تحت حمراء أو فوق بنفسجية، فيمكنها أن تُصبح مشعّة.

القرار:

لجعل المادة مشعّة، يجب أن يغيّر شيء ما أنويتها بحيث لا تعود مستقرة. يتطلب مثل هذا التغيير طاقة كبيرة أكثر من التي يمكن أن يوفرها أحد تلك الفوتونات ذات الطاقة المنخفضة. الشكل الوحيد من الأشعة الكهرومغنطيسية الذي له طاقة كافية لكل فوتون للتأثير على الأنوية هو أشعة جاما وأحيانا أشعة إكس.

تحقق من فهمك # ٦: ليس جيّدا أكله (للإجابة، انظر صفحة ٥٣٤)

اليود الطبيعي ^{127}I هو مستقر للأبد. لكن اليود الناتج من الانشطار، ^{131}I، مشعّ وله عمر نصف مقداره حوالي 8 أيام. ما هي تداعيات أكل ^{131}I؟



١٦-٢ التصوير الطبي والإشعاع

حدثت بعض التطورات المهمة في مجال الرعاية الطبية على الحدود بين الطب والفيزياء. فبينما صقل العلماء فهمهم عن التركيب الذري والجزيئي وتعلموا التحكّم بأشكال متعددة من الإشعاع، فلقد اخترعوا أدوات عظيمة الفائدة في تشخيص وعلاج الأمراض والإصابات. تستمر التطورات بتطبيقات حديثة للفيزياء تظهر في المواضع السريرية كلما نظرت حولك تقريباً. في هذا القسم، سنفحص مثالين من أهم الأمثلة في الفيزياء الطبية: تقنيات التصوير المستخدمة في الكشف عن المشاكل والعلاجات الإشعاعية المستخدمة لعلاجها.

أسئلة للتفكير

ما هو الشيء المختلف بين العظام والأنسجة والذي يجعل العظام تبدو مضيئة في صورة أشعة إكس بينما تظهر الأنسجة مظلمة؟ كيف يمكن للتصوير المقطعي *CT* أو تصوير الرنين المغنطيسي *MRI* أن يوضّح منظراً مقطعياً لإنسان حيّ دون لمس ذلك الإنسان؟ إذا كانت أشعة إكس هي شكل من أشكال الأشعة الكهرومغنطيسية، فلماذا لا تمتصها المواد المعتمة؟ لماذا يُظهر التصوير المقطعي *CT* العظام في المقام الأول بينما يُظهر التصوير بالرنين المغنطيسي *MRI* الأنسجة في المقام الأول؟ الجسيمات دون الذرية المستخدمة في العلاج الإشعاعي لها في الغالب طاقات هائلة. من أين تأتي هذه الطاقات؟

تجارب يمكن القيام بها

أحد انتصارات التصوير الطبي هو مقدرته على إيجاد أجسام داخل إنسان دون دخول جسمه فعليا. وكثيراً ما يتم ذلك باستخدام أشعة إكس للنظر خلال الإنسان من عدة زوايا مختلفة، فمن كل نقطة ولوج، تقوم آلة التصوير بتحديد أي الأجسام تقع على اليسار أو اليمين من بعضها البعض،و لكن لا يمكنها أن تحدد بعد هذه الأجسام عن بعضها البعض. رغم ذلك، بربط أجزاء المعلومات سوية من العديد من المشاهدات المختلفة، يمكن لآلة التصوير أن تحدد كل جسم تماما. يمكنك أن تجرّب هذه العملية بنثر عدد من العملات النقدية على سطح طاولة صغيرة، دون النظر لرؤية أين تستقر كل عملة. أغمض عينيك واخفض رأسك لارتفاع سطح الطاولة. افتح عينا واحدة فقط وألق نظرة وجيزة على العملات. إذا

كانت الإضاءة ساطعة ومنتظمة، ولم تحرك رأسك، فإنك ستجد صعوبة في معرفة بُعد العملات عن عينك. في حين ستعلم شيئا ما عن موقع كل عملة، إلا أنك لن تعلم علماً كافياً لتحديد موقع كل عملة على سطح الطاولة. الآن حرك رأسك لموضع جديد حول الطاولة وخذ نظرة وجيزة ثانية. مرة أخرى، لن تستطيع معرفة بُعد العملات، لكنك ستحصل على المزيد من المعلومات عن مواقعها النسبية. كم عدد المشاهدات التي يجب أن تقوم بها لتعلم تماما أين موقع العملات؟ كيف يعقّد وجود العديد من العملات المعتمة المشكلة؟ لماذا يسهّل عليك تحديد مواقع العملات أن تفتح عينيك في نفس الوقت؟

أشعة إكس

منذ اكتشاف أشعة إكس في عام ١٨٩٥م، لعبت هذه الأشعة دورا مهما في العلاج الطبي. فقد كانت فائدتها واضحة من الليلة التي تم اكتشافها فيها. كان ذلك في ٨ نوفمبر وكان الفيزيائي الألماني وليام كونارد رونتجن (١٨٤٥ - ١٩٢٣م) يقوم بتجربة باستخدام تفريغ كهربائي في أنابيب مفرّغة. كان قد غطّى الأنبوب كاملاً بورق مقوّى أسود اللون وكان يعمل في غرفة مظلمة. بدأت شاشة مغطاة بمادة فسفورية تبعُد مسافة عن الأنبوب بالتوهّج. لقد كان هناك نوع من الإشعاع يُتحرّر من الأنبوب، ماراً خلال الورق المقوّى والهواء، ومتسببا في استضاءة الشاشة. وضع رونتجن عدة أجسام في مسار الأشعة، لكنها لم تحجب التدفق. أخيرا، وضع يده أمام الشاشة ورأى صورة مظللة لعظامه. كان رونتجن قد اكتشف أشعة إكس وأحد أشهر تطبيقاتها في الوقت نفسه.

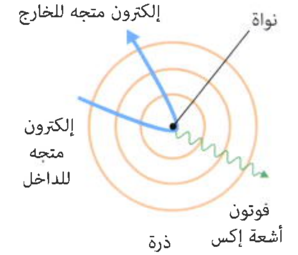
كان الاستخدام الطبي الأول لأشعة إكس في ١٣ يناير عام ١٨٩٦م، عندما استخدمها طبيبان بريطانيان لإيجاد إبرة في يد امرأة. أصبحت أشعة إكس مألوفة في المستشفيات بشكل سريع كتقنية جديدة رائعة للتشخيص، ولكن هذه المقدرة على التصوير لم تكن خالية من آثار جانبية. فعلى الرغم من أن التعرّض ذاته لم يكن مؤلما، إلا أن التعرّض المفرط لأشعة إكس تسبب في حروق وجروح عميقة أخذت بعضا من الوقت في الظهور. من الواضح أن أشعة إكس كانت تقوم بشيء أكثر خفاء للأنسجة من مجرد تسخينها.

أشعة إكس هي شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغنطيسي، مثل موجات الراديو، والمايكروويف، والضوء. يتم التمييز بين هذه الأشعة الكهرومغنطيسية المختلفة عن طريق تردداتها وأطوالها الموجية - في حين أن موجات الراديو لها ترددات منخفضة وأطوال موجية طويلة، فإن لأشعة إكس ترددات عالية جدا وأطوال موجية صغيرة، ولكنها أيضا تُميِّز عن طريق طاقة فوتوناتها. وبسبب انخفاض تردد موجات الراديو، فإن فوتوناتها تحمل طاقة قليلة. يحمل الفوتون ذو التردد المتوسط للضوء الأزرق أو فوق البنفسجي طاقة كافية لإعادة ترتيب رابطة واحدة في جزيء. بينما يحمل فوتون أشعة إكس ذو التردد العالي الكثير من الطاقة بحيث يمكنه أن يكسر العديد من الروابط ويمزق الجزيئات.

في فرن المايكروويف، تعمل فوتونات المايكروويف سوية لتسخين وطهي الطعام. إن مقدار الطاقة في كل فوتون مايكروويف ليس مهماً لأنه لا يعمل وحده. ولكن في العلاج الإشعاعي، تكون فوتونات أشعة إكس مستقلة. كل واحد منها يحمل طاقة كافية لتتلف أي جزيء يمتصه. ولهذا تتضمن حروق أشعة إكس القليل من الحرارة وتظهر بعد فترة زمنية من التعرّض - إن التلف الجزيئي الذي تسببه أشعة إكس يأخذ وقتا من الزمن لقتل الخلايا.

تحقق من فهمك # ١: أنواع الإشعاع (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

أيهما له علاقة أكبر بأشعة إكس: حزمة الإلكترونات التي تسير خلال أنبوب المغنطرون في فرن مايكروويف أم الضوء تحت الأحمر من فتيلة ساخنة في حمّاصة الخبز؟

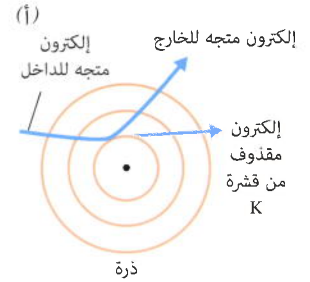


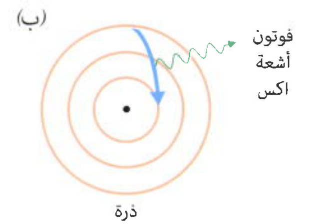
شكل ١,٢,١٦: عندما يتقوّس مسار الإلكترون سريع الحركة حول نواة ضخمة، فإنه يتسارع بسرعة. يكوّن هذا التسارع المفاجئ فوتون أشعة إكس المفرملة (bremsstrahlung)، والذي يحمل معه بعضا من طاقة الإلكترون.

صناعة أشعة إكس

تعمل مصادر أشعة إكس الطبية باصطدام إلكترونات سريعة الحركة بذرات ثقيلة. تكوّن هذه التصادمات أشعة إكس عن طريق آليتين فيزيائيتين مختلفتين: الفرملة وفلورة أشعة إكس.

تحدث الفرملة كلما تسارع جسم مشحون. هذه العملية ليست شيئاً حديثاً، إذ نعلم أن موجات الراديو تنبعث عندما يتسارع جسم مشحون في هوائي. لكن في هوائي المذياع، تتسارع الإلكترونات ببطء وتبعث فوتونات ذات طاقة منخفضة. وتشير الفرملة عادة للحالات التي يتسارع فيها الجسم المشحون بسرعة عالية ويبعث فوتوناً ذا طاقة عالية جداً. ففي أنبوب أشعة إكس المفرملة، يتقوّس مسار إلكترون سريع الحركة حول نواة ضخمة ويتسارع بشكل مفاجئ فيبعث فوتون أشعة إكس (شكل ١,٢,١٦). يحمل هذا الفوتون جزءاً كبيراً من الطاقة الحركية للإلكترون. وكلما اقترب الإلكترون من النواة، ازداد تسارعه وزادت الطاقة التي يُعطيها لفوتون أشعة إكس. ولكن احتمالية عدم إصابة الإلكترون للنواة أكبر من احتمالية اصطدامه بها تقريباً، فمن الراجح أن تُنتج الفرملة فوتون أشعة إكس ذا طاقة منخفضة أكثر من فوتون ذي طاقة مرتفعة. في فلورة أشعة إكس، يصطدم الإلكترون السريع الحركة بإلكترون داخلي في ذرة ثقيلة ويُخرج ذلك الإلكترون تماما من الذرة (شكل ٢,٢,١٦). يترك هذا الاصطدام الذرة كأيون موجب، مع وجود مدار فارغ قريب من نواتها. بعد ذلك يخضع إلكترون في ذلك الأيون لانتقال إشعاعي، فينتقل من مدار خارجي إلى هذا المدار الداخلي الفارغ ويُحرّر كمية هائلة من الطاقة أثناء هذه العملية. تخرج هذه الطاقة من الذرة على هيئة فوتون أشعة إكس. ولأن هذا الفوتون له طاقة يُحدّدها تركيب مدارات الأيون، فإنها تُسمّى أشعة إكس المميزة.



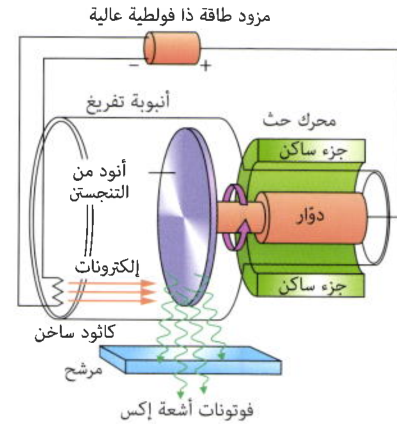


شكل ٢,٢,١٦: (أ) عندما يصطدم إلكترون سريع الحركة بإلكترون في أحد المدارات الداخلية لذرة ثقيلة، فإنه يمكنه أن يُخرج ذلك الإلكترون من الذرة. (ب) بعد قليل يسقط إلكترون من أحد مدارات الذرة الخارجية إلى المدار الفارغ في انتقال إشعاعي مكوّنًا أشعة إكس المميزة.

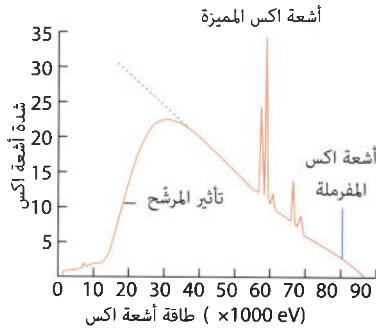
لمناقشة الطاقات التي تحملها فوتونات أشعة إكس، سنستخدم وحدة الطاقة التي تعرضنا لها في القسم ١٤-٢: الإلكترون فولت أو eV. تحمل فوتونات الضوء المرئي طاقات تتراوح بين 1.6 (ضوء أحمر) و3.0eV (ضوء بنفسجي). وبما أن الفوتونات فوق البنفسجية في ضوء الشمس لها طاقات تصل إلى7eV، فهي قادرة على كسر الروابط الكيميائية وإحداث حروق شمسية، ولكن لفوتونات أشعة إكس طاقات أعلى بكثير حتى من الفوتونات فوق البنفسجية.

في أنبوب أشعة إكس طبي اعتيادي، تنبعث إلكترونات من مهبط ساخن وتتسارع خلال الفراغ نحو مصعد معدني موجب الشحنة (شكل ٣,٢,١٦). المصعد هو عبارة عن قرص من التنجستن أو المليبديوم، يدور بسرعة لمنعه من الذوبان. تتحدّد طاقة الإلكترونات عند اصطدامها بالمصعد بفرق الفولطية عبر الأنبوب. في آلة أشعة إكس الطبية، يكون هذا الفرق في الفولطية في الغالب 87,000V تقريبا، لذا، فإن كل إلكترون له طاقة مقدارها حوالي 87,000eV. وبما أن الإلكترون يعطي جزءا كبيرا من طاقته لفوتون أشعة إكس الذي ينتجه، فإن الفوتونات المغادرة للأنبوب يمكنها أن تحمل إلى ما مقداره 87,000eV من الطاقة. لا عجب أن أشعة إكس يمكنها أن تتلف الأنسجة!

عندما تصطدم الإلكترونات بهدف من الذرات الثقيلة، فإنها تبعث كلاً من أشعة إكس المفرملة والمميزة (شكل ٤,٢,١٦). أشعة إكس المميزة لها طاقات محددة فتبدو على هيئة قمم في طيف أشعة إكس الإجمالي. إن أشعة إكس المفرملة لها طاقات مختلفة لكن شدتها أكبر عند الطاقات المنخفضة. وبما أن فوتونات أشعة إكس ذات الطاقة المنخفضة يمكنها أن تُحدث ضرراً للجلد وليست مفيدة في التصوير أو العلاج الإشعاعي، فإن آلات أشعة إكس الطبية تستخدم مواد ماصّة، مثل الألومنيوم لترشيحها.



شكل ٣،٢،١٦: في آلة أشعة إكس الطبية، تتسارع الإلكترونات من فتيلة ساخنة نحو قرص معدني موجب الشحنة. تبعث الإلكترونات أشعة إكس عندما تصطدم بذرات القرص. يوجد محرك يدير القرص لمنعه من الذوبان. يمتص المرشّح أشعة إكس غير المفيدة ذات الطاقة المنخفضة.



شكل ٤،٢،١٦: عندما تصطدم إلكترونات طاقتها 87,000eV بمعدن التنجستن، فإنها تبعث أشعة إكس عن طريق الفرملة والفلورة. في حين أشعة إكس المفرملة لها مدى واسع من الطاقات، يقوم مرشّح ماص بحجب الأشعة المنخفضة الطاقة. تنتج أشعة إكس الفلورية أشعة إكس مميزة بطاقات محددة.

تحقق من فهمك # ٢: منشأ أشعة السينكروترون (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

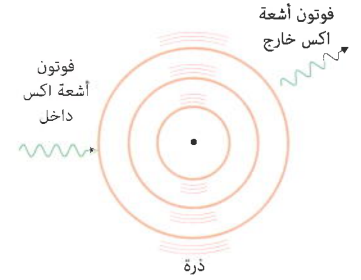
كثيراً ما تُبنى معجّلات الجسيمات الضخمة المستخدمة في فيزياء الطاقة العالية على هيئة حلقات حتى تستطيع استخدام نفس الجسيمات المشحونة كهربائياً مرة بعد أخرى. بينما تسير هذه الجسيمات في دوائر حول الحلقات، فإنها تبعث أشعة إكس. فسّر ذلك.

استخدام أشعة إكس للتصوير

لأشعة إكس استخدامان مهمان في الطب: التصوير والعلاج الإشعاعي. في التصوير بأشعة إكس، يتم إرسال أشعة إكس خلال جسم المريض إلى فيلم أو مستكشف أشعة إكس. في حين يتمكن بعض أشعة إكس من المرور خلال الأنسجة، إلا أن معظمها يُحجب بواسطة العظام. تكوّن عظام المريض صورا مظلمة على الفيلم خلفها. في العلاج الإشعاعي بأشعة إكس، يتم إرسال أشعة إكس مرة ثانية خلال جسم المريض، لكن الآن تفاعلها المميت مع الأنسجة المريضة هو المهم.

تتفاعل فوتونات أشعة إكس مع الأنسجة والعظام من خلال أربع عمليات رئيسية: الاستطارة المرنة، والأثر الكهروضوئي، واستطارة كمبتون، وتكوّن زوج الإلكترون - بوزيترون.

الاستطارة المرنة مألوفة لنا من قبل كسبب زرقة السماء: حيث تعمل الذرة كهوائي للموجة الكهرومغنطيسية المارة، فتمتصها وتعيد إرسالها دون أخذ أي من طاقتها (شكل ٥،٢،١٦). ولأن هذه العملية ليس لها أي تأثيرً على الذرة تقريبا، فإن الاستطارة المرنة ليست مهمة في العلاج الإشعاعي، ولكنها شيء مزعج للتصوير بأشعة إكس لأنها تنتج خلفية غير واضحة: إن بعض أشعة



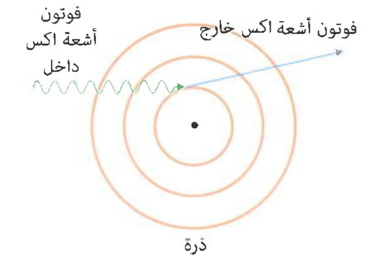
شـكل ٥،٢،١٦: عندما يستطير فوتون أشعة إكس بشكل مرن من ذرة، فإن الذرة بكاملها تعمل كهوائي. يذبـذب الفوتون المار جميع الشـحنات في الذرة، وهذه الشحنات تمتص الفوتون وتعيد بعثه في اتجاه جديد.

إكس المارة خلال المريض ترتد مثل الكرات وتصل للفيلم من زوايا غريبة. لإلغاء فوتونات أشعة إكس المرتدة، تستخدم آلات أشعة إكس مرشحات لحجب أشعة إكس التي لا تقترب من الفيلم من اتجاه مصدر الأشعة.

الأثر الكهروضوئي هو ما يجعل التصوير بأشعة إكس ممكنا. ففي هذا الأثر، يحُث فوتون مار حدوث انتقال إشعاعي في ذرة: حيث يمتص أحد إلكترونات الذرة الفوتون فيُقذف خارج الذرة تماماً (شكل ٦،٢،١٦). فإذا كانت الذرة تستخدم فوتون أشعة إكس لإزاحة إلكترون من مدار لآخر، فإن هذا الفوتون يجب أن يكون له المقدار الصحيح من الطاقة. لكن لأن الإلكترون الحرّ يمكن أن يكون له أي مقدار من الطاقة، فإن الذرة يمكنها أن تمتص أي فوتون من أشعة إكس له طاقة كافية لقذف أحد إلكتروناتها. يُستخدم جزء من طاقة الفوتون لإخراج الإلكترون من الذرة، وتُعطى الطاقة المتبقية للإلكترون المقذوف كطاقة حركية.

ولكن احتمالية حدوث مثل هذا الانبعاث الضوئي تقل بينما تزيد طاقة الإلكترون المقذوف. إن هذا التناقص في الاحتمالية يجعل من الصعب لذرة صغيرة أن تمتص فوتون أشعة إكس، حيث أن جميع إلكتروناتها مرتبطة بروابط ضعيفة نسبيا وسيعطي فوتون أشعة إكس طاقة حركية كبيرة للإلكترون المقذوف. وبدلا من بعث إلكترون ذي طاقة عالية، فإن الذرة الصغيرة تتجاهل في الغالب فوتون أشعة إكس المار.

على النقيض من ذلك، بعض الإلكترونات في الذرة الكبيرة مرتبطة تماما بإحكام وتتطلب معظم طاقة فوتون أشعة إكس لإزالتها. ستغادر هذه الإلكترونات بطاقة حركية صغيرة نسبيا. ولأن احتمالية عملية الانبعاث الضوئي هي أكبر عند إنتاج إلكترونات ذات طاقة منخفضة، فإنه من المحتمل أن تمتص الذرة الكبيرة فوتون أشعة إكس. وبالتالي، في حين أنه من النادر أن تمتص الذرات الصغيرة الموجودة في الأنسجة (كربون، وهيدروجين، وأكسجين، ونيتروجين) أشعة إكس الطبية، إلا أن الذرات الكبيرة الموجودة في العظام (كالسيوم وفسفور) تمتص أشعة إكس باستمرار. ولهذا تُسقِط العظام ظلاً واضحاً على فيلم أشعة إكس. إن ظل الأنسجة مرئي أيضا، لكنه أقل وضوحا.



شكل ٦،٢،١٦: في الأثر الكهروضوئي، يُخرج الفوتون الممتص إلكترونا من ذرة. يُستخدم جزء من طاقة الفوتون لإزالة الإلكترون من الذرة، وتُصبح الطاقة المتبقية طاقة حركية للإلكترون.

على الرغم من أن صورة ظل واحدة لداخل المريض قد تساعد في تشخيص عظم مكسور، إلا أن المشاكل الأكثر خفاء قد لا تكون ظاهرة في صورة أشعة إكس واحدة. لرؤية صورة أفضل لما يحدث داخل المريض، يحتاج فنّي الأشعة أن يرى الظل من زوايا عديدة مختلفة. والأفضل من ذلك، يمكن لفنّي الأشعة أن يستخدم ماسحاً مقطعياً محوسباً (computed tomography CT scan). إن هذا الجهاز المحوسب يكوّن صور ظل أشعة إكس تلقائياً من مئات من الزوايا والمواضع المختلفة ويُنتج خريطة تفصيلية ثلاثية الأبعاد لجسم المريض باستخدام أشعة إكس.

يعمل الماسح المقطعي المحوسب على «مقطع» واحد من جسم الإنسان في كل مرة، فهو يرسل أشعة إكس خلال هذا المقطع الضيّق من كل زاوية ممكنة، بما في ذلك الزاويتين الموضحتين في الشكل (٧،٢،١٦)، ويحدد موقع العظام والأنسجة في ذلك المقطع (شكل ٨،٢،١٦). ثم يزيح الماسح جسم المريض للعمل على المقطع التالي.

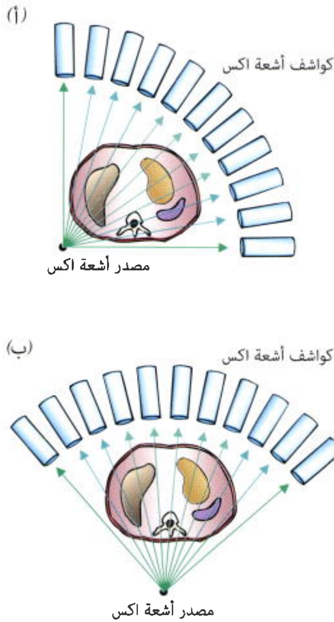
تحقق من فهمك # ٣: نوافذ الألومنيوم لأشعة إكس

(للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

إن ذرات الألومنيوم أصغر حجما من ذرات الكالسيوم. في حين يحجب معدن الألومنيوم الضوء المرئي، إلا أنه شفّاف نسبياً لأشعة إكس ذات الطاقة العالية. فسّر ذلك.

استخدام أشعة إكس في العلاج

يستخدم العلاج بالإشعاع أشعة إكس أيضا، ولكنها ليست مثل تلك المستخدمة في التصوير الطبي. وعلى الرغم من أن الأنسجة تمتص فوتونات تصوير أقل من العظام، إلا أن معظم فوتونات التصوير تُمتص قبل أن تستطيع المرور خلال الأنسجة السميكة. على سبيل المثال، تتمكن حوالي 10 ٪ فقط من فوتونات التصوير من المرور خلال ساق المريض حتى عندما لا تمر بالعظام. هذه النسبة هي كافية لتكوين صورة، لكنها غير كافية في العلاج الإشعاعي لأن معظم أشعة إكس التصويرية ستُمتص قبل أن تصل لورم عميق، فبدلا من قتل الورم، فإن التعرّض الشديد لأشعة إكس سيقتل الأنسجة القريبة من جلد المريض.



شكل ٧,٢,١٦: تتكوّن صورة التصوير المقطعي المحوسب أو صور ماسح CT من تحليل صور أشعة إكس المأخوذة من عدة زوايا ومواضع مختلفة. يكوّن مصدر أشعة إكس ومصفوفة من كواشف أشعة إكس الإلكترونية حلقة تدور حول المريض بينما يتحرّك المريض ببطء خلال الحلقة.

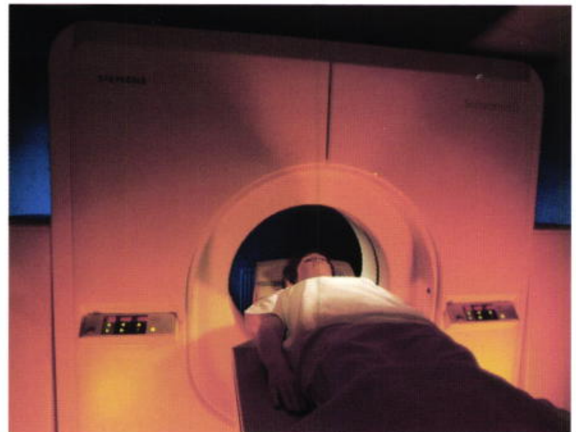
لمهاجمة الأنسجة السرطانية العميقة تحت الجلد، يستخدم العلاج بالإشعاع فوتونات ذات طاقة عالية جدا. فعند طاقات فوتونية قريبة من 1,000,000eV، يصبح الأثر الكهروضوئي نادرا في الأنسجة والعظام، وتزيد احتمالية وصول الفوتونات إلى الورم. لا تزال الفوتونات تودِع طاقة مُهلكة في الأنسجة والورم، لكنها تقوم بذلك من خلال تأثير جديد: وهو استطارة كومبتون.

تحدث استطارة كومبتون عندما يصطدم فوتون أشعة إكس بإلكترون واحد بحيث يرتد الجسمان من على بعضها (شكل ٩,٢,١٦). يقذف فوتون أشعة إكس الإلكترون خارج الذرة. إن هذه العملية تختلف عن الأثر الكهروضوئي لأن استطارة كمبتون لا تتضمّن الذرة بأكملها ويتم استطارة الفوتون (ارتداده) بدلا من امتصاصه. تشابه الفيزياء التي تقع خلف هذا الأثر تلك التي خلف اصطدام كرتي بيلياردو، فعلى الرغم من أنها معقدة نتيجة للنظرية النسبية، فكونه يحدث هو إثبات على أن الفوتون يحمل كلاً من طاقة وكمية حركة وأن هاتين الكميتين محفوظتان عندما يصطدم جسيم ضوئي بجسيم مادي.

إن استطارة كومبتون بالغة الأهمية في العلاج الإشعاعي. عندما يتعرّض مريض لفوتونات طاقتها 1,000,000eV، فإن معظم الفوتونات تمر مباشرة خلاله، لكن جزءاً صغيراً يخضع لاستطارة كومبتون ويترك بعضا من طاقته خلفه. هذه الطاقة تقتل الخلايا ويمكن استخدامها لتدمير الورم، وبالاقتراب من الورم من عدة زوايا مختلفة خلال جسم المريض، فإن المعالجة يمكنها أن تُقلّل من إصابة الأنسجة الصحيحة حول الورم مع إعطاء الورم ذاته جرعة قاتلة من الإشعاع.

لكن استطارة كومبتون ليست هي التأثير الوحيد الذي يحدث عندما تواجه فوتونات ذات طاقة عالية مادة ما. إن أشعة إكس التي لها طاقة أعلى من 1,022,000eV يمكنها أن تقوم بشيء مذهل عندما تمر خلال ذرة: يمكنها أن تتسبب في إنتاج زوج إلكترون – بوزيترون. البوزيترون هو مادة مضادة مكافئة للإلكترون. إن كوننا

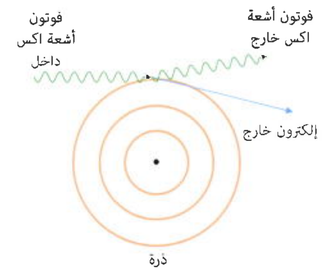
انتاج ديب لايت/صور مؤسسة فوتو ريسرتشرز



ألفريد باسياكا/ صور مؤسسة فوتو ريسرتشرز



شكل ٨,٢,١٦: يستخدم الماسح المقطعي المحوسب (CT) على اليسار أشعة إكس لتصوير طبقة تلو طبقة من جسم المريض. وبمساعدة حاسوب ، يُنتج الماسح خريطة ثلاثية الأبعاد (3D) للعناصر الثقيلة في المريض. يظهر جزء من هذه الخريطة، موضحا رأس المريض، في الصورة التي على اليمين.



شكل ٩,٢,١٦: في استطارة كومبتون، يصطدم فوتون أشعة إكس بإلكترون واحد فيرتدان من على بعضهما. يُقذف الإلكترون خارج الذرة.

متناظر من عدة أوجه، وأحد تناظراته القريبة من الكمال هو وجود مواد مضادة. إن كل جسيم تقريباً في الطبيعة له جسيم مضاد بكتلة مماثلة ولكن صفات متعاكسة. البوزيترون أو الإلكترون المضاد له نفس كتلة الإلكترون، ولكنه موجب الشحنة. كما أن هناك بروتونات مضادة ونيوترونات مضادة.

لا تحدث المادة المضادة طبيعياً على الأرض، لكن يمكن تكوينها في التصادمات ذات الطاقات العالية. فعندما يصطدم فوتون ذو طاقة عالية مع المجال الكهربائي لذرة، فإن الفوتون يمكنه أن يصبح إلكتروناً وبوزيتروناً. في القسم السابق، ناقشنا تحوّل المادة إلى طاقة؛ إن تكوّن الزوج هو مثال لتحوّل الطاقة إلى مادة. يحتاج تكوين إلكترون وبوزيترون طاقة مقدارها 511,000eV تقريبا، فيجب أن تكون طاقة الفوتون على الأقل 1,022,000eV لتكوين زوج واحد. أي طاقة إضافية لتصبح طاقة حركية في الجسيمين.

لا يعيش البوزيترون طويلا في المريض. بل سريعا ما يصطدم بإلكترون ويُبيد أحدهما الآخر - فيختفي الإلكترون والبوزيترون وتصبح كتلتهما طاقة. يتحوّلان إلى فوتونات بطاقة مجموعها 1,022,000eV على الأقل. إذاً تصبح الطاقة مادة لفترة وجيزة ثم تعود لطاقة مرة أخرى. تحدث هذه العملية العجيبة في العلاج الإشعاعي ذي الطاقة العالية وتُصبح ذات أهمية كبيرة عند طاقات فوتونات أعلى من 10,000,000eV. ليس من المدهش أنها تساعد أيضاً على قتل الأورام.

تحقق من فهمك #٤: مزيدا من شيء جيّد (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

ما مقدار الطاقة تقريباً التي يحتاجها الفوتون لتكوين زوج بروتون - بروتون مضاد؟

أشعة جاما

إن إنتاج فوتونات ذات طاقة عالية جدا ليس بنفس سهولة إنتاج الفوتونات المستخدمة في التصوير بأشعة إكس. من حيث المبدأ، يمكن أن يكوّن مزوّد طاقة فرقاً ضخماً في الفولطية خلال أنبوب أشعة إكس بحيث ترتطم إلكترونات ذات طاقة عالية جدا بذرات معدن وتُنتج فوتونات ذات طاقة عالية. لكن مزوّدات الطاقة فئة المليون فولت معقدة وخطرة، فتُستخدم طرق أخرى بدلا من ذلك.

من أسهل طرق الحصول على فوتونات ذات طاقة عالية هي من خلال الاضمحلال الإشعاعي للنظائر. إن النظير الأكثر شيوعا في العلاج الإشعاعي هو كوبالت 60 (^{60}Co). لنواة ^{60}Co العديد من النيوترونات، ومثل العديد من الأنوية الغنية بالنيوترونات، تخضع نواة ^{60}Co لاضمحلال بيتا - حيث يتفكك أحد نيوتروناتها إلى بروتون وإلكترون و نيوترينو (أو بالتحديد نيوترون مضاد). بدءا باضمحلال بيتا، يخضع ^{60}Co لسلسلة من التحولات التي تنتج فوتونين لهما طاقة عالية: أحدهما له طاقة 1,170,000eV والآخر له طاقة 1,330,000 eV. يتخلل هذان الفوتونان الأنسجة بشكل جيّد وهي فعّالة في قتل الأورام.

على الرغم من أن العملية التي يُنتج بها ^{60}Co هذين الفوتونين اللذين لهما طاقة عالية معقدة، إلا أن اضمحلال بيتا ذاته يوضّح أن البروتونات والإلكترونات والنيوترونات ليست ثابتة وأن هناك جسيمات دون ذرية أخرى في كوننا. النيوترونات التي تكون وحدها أو في أنوية بها الكثير من النيوترونات مشعّة وتواجه اضمحلال بيتا، فعندما يحدث اضمحلال بيتا في نواة ^{60}Co، فإن الإلكترون السالب الشحنة والنيوترينو المتعادل الشحنة يهربان بسرعة من النواة، ولكن البروتون المتكوّن حديثا يظل، وهكذا تُصبح النواة نيكل 60 (^{60}Ni).

النيوترينو هو جسيم دون ذري ليس له شحنة وكتلته صغيرة. لا توجد النيوترينوات في الذرات العادية.

وبالرغم من أهميتها في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات الأولية، إلا أنه من الصعب مشاهدتها مباشرة لأنها تسير بالقرب من سرعة الضوء ونادرا ما تصطدم بأي شيء، وبدون وجود شحنة عليها لا تستطيع المساهمة في القوى الكهرومغنطيسية، وعلى خلاف النيوترون المتعادل كهربائيا، لا يواجه النيوترينو القوة النووية. يواجه الجاذبية والقوة النووية الضعيفة فقط، وهي النوع الرابع والأخير من أنواع القوى الرئيسية المعروفة في كوننا. (القوى الرئيسية الثلاثة الأخرى هي قوة الجاذبية، والقوة الكهرومغنطيسية والقوة النووية القوية – وهي صورة مكتملة أكثر للقوة النووية التي ناقشناها في القسم السابق.) بما أن القوة النووية الضعيفة ضعيفة وتحدث فقط بين الجسيمات القريبة جدا من بعضها، فإنه نادراً ما تُظهر القوة النووية الضعيفة نفسها. إن أحد المناسبات القليلة التي تلعب بها القوة النووية الضعيفة دورا مهما هو في اضمحلال بيتا.

مع عدم وجود أي طريقة لدفع أو سحب جسيم آخر، يمكن للنيوترينو أن يمر بسهولة خلال الأرض بأكملها. يتم الكشف عن النيوترينو أحيانا، ولكن فقط بمساعدة كواشف ضخمة. ولهذا وضّح الفيزيائيون في البداية أن النيوترينو ينبعث من النيوترون المضمحل بقياس الطاقة وكمية الحركة قبل وبعد الاضمحلال. إن البروتون والإلكترون الناتجان من الاضمحلال ليس لهما نفس الطاقة الكلية وكمية الحركة الكلية التي كانت للنيوترون قبل الاضمحلال، فلا بد أن يكون هناك شيء ما أخذ الطاقة وكمية الحركة المفقودة، وهذا الشيء هو النيوترينو.

ما إن يتحوّل ^{60}Co إلى ^{60}Ni فإن الاضمحلال لم ينتهِ بعد، فنواة ^{60}Ni المتكوّنة ما زال لديها طاقة إضافية داخلها. إن الأنوية هي أنظمة فيزيائية كمية معقدة مثل الذرات، ولها مستويات إثارة أيضا. نواة ^{60}Ni هي في مستوى إثارة، ويجب أن تخضع لانتقالين إشعاعيين قبل أن تصل للحالة الأرضية. تنتج هذه الانتقالات الإشعاعية فوتونات ذات طاقة عالية أو أشعة جاما مميزة لنواة ^{60}Ni – أحدها له طاقة 1,170,000eV والآخر طاقته 1,330,000eV. إن أشعة جاما هي ما تجعل العلاج الإشعاعي باستخدام ^{60}Co ممكنا.

تحقق من فهمك # ٥: زيارة من بائع غادر (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

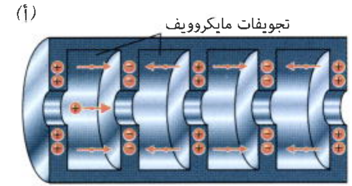
إذا عرض عليك شخص أن يبيعك قنينة من النيوترينوات، ستكون مغفلا إذا اشتريتها. ما هو الشيء الخطأ في فكرة زجاجة من النيوترينوات؟

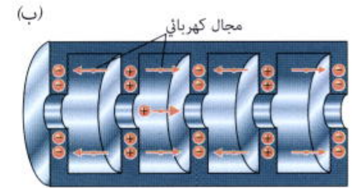
معجّلات الجسيمات

إن الإشعاع الكهرومغنطيسي ليس هو الشكل الوحيد من أشكال الإشعاع المستخدمة في علاج المرضى. تُستخدم أيضا الجسيمات ذات الطاقة العالية مثل الإلكترونات والبروتونات. مثل كرات البلياردو الصغيرة جدا، تصطدم هذه الجسيمات السريعة الحركة بالذرات داخل الأورام وتفككها، وكالمعتاد، يميل هذا التلف الذري والجزيئي لقتل الخلايا وتحطيم الأورام.

لكن الحصول على جسيمات دون ذرية ذات طاقة عالية ليس بالأمر السهل. يمكن استخدام مزوّدات طاقة ذات فولطية عالية لتعجيل إلكترون أو بروتون لحوالي 500,000eV، ولكن هذا ليس كافيا. فعندما يدخل جسيم مشحون لنسيج، فإنه يواجه قوى كهربائية شديدة وينحرف بسهولة عن مساره، وللتأكد من أنه يسير على خط مستقيم، إلى أن يصل إلى الورم، يجب أن يكون للجسيم طاقة هائلة. لإعطاء كل جسيم مشحون مليون أو حتى بليون إلكترون – فولت من الطاقة المطلوبة في العلاج الإشعاعي يحتاج الأمر إلى معجّل جسيمات.

تستخدم معجلات الجسيمات تجاويف معدنية تتصرف مثل دوائر الحوض والهوائيات التي ناقشناها في القسم ١٣-١. يمكن لأي تركيب معدني تقريباً أن يعمل في نفس الوقت كمكثّف ومحثّ وبالتالي يكون له رنين طبيعي للشحنة المتأرجحة. في التجاويف الرنينية لمعجّل جسيمي، تكوّن هذه الشحنة المتأرجحة مجالات كهربائية عظيمة تتغيّر مع الزمن، وتدفع هذه المجالات الكهربائية الجسيمات المشحونة خلال الفراغ إلى أن تصل لطاقات هائلة.





شكل ١٠,٢,١٦: في المعجّل الخطي، تُدفع الجسيمات المشحونة المتحرّكة إلى الأمام عن طريق مجالات كهربائية تتغيّر مع الزمن. (أ) بينما تمر الشحنة الموجبة المتحرّكة من خلال التجويف الأول من سلسلة من تجويفات المايكروويف، فإن المجال هناك يدفعها إلى الأمام. (ب) ما أن تدخل الشحنة المتحركة التجويف الثاني، إلا وتكون المجالات قد انعكست ويدفعها المجال هناك إلى الأمام مرة أخرى.

إن نوعاً مهماً من أنواع معجلات الجسيمات هو المعجّل الخطي. في هذا الجهاز، تدفع المجالات الكهربائية في سلسلة من التجاويف الرنينية الجسيمات المشحونة إلى الأمام في خط مستقيم (شكل ١٠,٢,١٦). كل من هذه التجاويف له شحنة تتأرجح ذهابا وإيابا على جداره بشكل تناغمي. فعندما تدخل حزمة صغيرة من الجسيمات المشحونة التجويف الأول من خلال ثقب، فإنها تُدفع فجأة إلى الأمام من قِبل المجال الكهربائي القوي داخل ذلك التجويف (شكل ١٠,٢,١٦ أ). تتسارع الحزمة إلى الأمام وتغادر التجويف الرنيني الأول بطاقة حركية أكثر مما كان لديها عند الدخول: لقد قام المجال الكهربائي في ذلك التجويف بشغل على الحزمة.

إذا كانت المجالات في التجاويف ثابتة، فإن المجال الكهربائي في التجويف الثاني سيبطئ الحزمة. في الشكل (١٠,٢,١٦ أ)، يمكنك أن ترى أن المجال الكهربائي في التجويف الثاني يشير في الاتجاه الخاطئ. لكن في الوقت الذي تصل فيه الحزمة للتجويف الثاني، يكون تأرجح الشحنات على جدرانه قد انعكس وكذلك انعكس المجال الكهربائي (شكل ١٠,٢,١٦ ب). تُدفع الحزمة مرة أخرى إلى الأمام، وتخرج من التجويف الثاني بمزيد من الطاقة الحركية.

يضيف كل تجويف رنيني في هذه السلسلة طاقة إلى الحزمة، بحيث يمكن لسلسلة طويلة من التجاويف أن تُعطي كل جسيم مشحون في الحزمة مليونات أو بليونات من الإلكترون – فولت من الطاقة. تأتي هذه الطاقة من مولدات المايكروويف التي تتسبب في تأرجح الشحنات في التجاويف الرنينية للمعجّل. فما على المعجّل حينئذ سوى إدخال جسيمات مشحونة في التجويف الأول، باستخدام أدوات مشابهة لتلك التي داخل أنبوب صور التلفاز، وستطير تلك الجسيمات المشحونة خارج آخر تجويف بطاقات هائلة (شكل ١١,٢,١٦). لكن تقنية التسريع هذه فيها بعض التعقيدات. أهمها، أن على كل تجويف أن يعكس مجاله الكهربائي في اللحظة الصحيحة لإبقاء الحزمة متسارعة نحو الأمام. ولتسهيل العملية، فإن لكل التجاويف نفس التردد الرنيني وكلها تعكس مجالاتها الكهربائية معًا. وبما أن الحزمة تقضي نفس الوقت في كل تجويف وبما أنها تتسارع عندما تنتقل من تجويف لآخر، فإن كل تجويف يجب أن يكون أطول من التجويف الذي يسبقه. لكن حينما تقترب الحزمة من سرعة الضوء، يحدث شيء غريب. تستمر طاقة الحزمة بالازدياد بينما تمر خلال التجاويف، لكن سرعتها تتوقف عن الازدياد. هذا التأثير هو نتيجة النسبية الخاصة، أي القوانين التي تحكم الحركة عند السرعات القريبة من سرعة الضوء. كما رأينا في قسم ٢,٤، فإن العلاقة البسيطة بين الطاقة الحركية والسرعة المعطاة في المعادلة (١,٢,٢) ليست صحيحة للأجسام المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء؛ ويجب أن نستخدم معادلة (٤,٢,٤) بدلا منها. وكنتيجة إضافية للنسبية، يمكن للحزمة أن تقترب من سرعة الضوء لكنها لا تستطيع أن تصل إليها حقيقة. فبالرغم من أن الطاقة الحركية لكل جسيم مشحون يمكن أن تصبح كبيرة جدا، إلا أن سرعتها محدودة بسرعة الضوء.

بما أن سرعة الحزمة تتوقف عن الازدياد بعد مرورها خلال التجاويف الأولى من المعجّل الخطي، فإن أطوال التجاويف المتبقية يمكنها أن تظل ثابتة. يجب تصميم التجاويف الأولى فقط بعناية لأخذ تزايد سرعة الحزمة داخلها في الاعتبار. تخرج الجسيمات المشحونة من المعجّل وهي تسير بسرعة الضوء تقريبا. ثم تمر خلال نافذة معدنية رقيقة تُبقي الهواء خارج المعجّل وتدخل جسم المريض. يكون للجسيمات طاقة كبيرة تمكّنها من الولوج بعمق داخل النسيج قبل أن تتوقف.

دقق في فهمك # ٦: إعادة تدوير الجسيمات (للإجابة، انظر صفحة ٥٢٥)

ترسل العديد من معجلات البحث العلمي كل حزمة من الإلكترونات خلال نفس السلسلة من التجاويف الرنينية عدة مرات. بعد أن تُغادر الحزمة التجويف الأخير، توجهها مغنطيسات في دائرة وترسلها مرة أخرى خلال التجاويف. مع كل مرور خلال التجاويف، تكتسب الحزمة مزيدا من الطاقة، فكيف يمكنها أن تظل متزامنة مع المجالات الكهربائية المنعكسة في التجاويف؟

التصوير بالرنين المغنطيسي

في حين تقوم أشعة إكس بعمل رائع في تصوير العظام، إلا أنها ليست جيّدة في تصوير الأنسجة. إن التقنية الأفضل لدراسة الأنسجة هي التصوير بالرنين المغنطيسي أو MRI. هذه التقنية تعمل على تحديد ذرات الهيدروجين بالتفاعل مع أنويتها المغنطيسية. فبما أن ذرات الهيدروجين شائعة في كل من جزيئات الماء والجزيئات العضوية، فإن إيجاد ذرات الهيدروجين هو طريقة جيّدة لدراسة الأنسجة الحيوية.

إن نواة ذرة الهيدروجين الاعتيادية، ^{1}H، هي بروتون. والبروتونات، مثل الإلكترونات، لها حالتان كميتان داخليتان محتملة، تُسمّى في العادة غزل للأعلى وغزل للأسفل. تسميتها بغزل مناسبة لأن بروتونات الغزل للأعلى والغزل للأسفل لهما كميتا حركة زاوية متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه. وعند وجود كلا الشحنة الكهربائية والدوران، فليس من المدهش أن المغنطيسية موجودة أيضا؛ فالتيارات الكهربائية هي مغنطيسية أيضا. بالتأكيد، أن للبروتونات قطبية ثنائية مغنطيسية - أي أقطاب شمالية وجنوبية متساوية على مسافة من بعضها. يعمل بروتون الغزل للأعلى كما لو أن له قطبه الشمالي أعلاه، بينما يعمل بروتون الغزل للأسفل كما لو أن له قطبه الجنوبي أعلاه.

عندما ينغمر بروتون في مجال مغنطيسي، فإنه يميل لصف قطبه الثنائي المغنطيسي مع ذلك المجال. إن القيام بذلك يقلل من طاقته المغنطيسية الكامنة. ولكن في حين ستصطف البروتونات تماما مع المجال عند درجة حرارة الصفر المطلق، إلا أنها تخفق بالقيام بذلك بالقرب من درجة حرارة الغرفة، حيث تثير الطاقة الحرارية البروتونات بحيث أنه حتى في المجال المغنطيسي القوّي المشير للأعلى يفوق عدد بروتونات الغزل للأعلى عدد بروتونات الغزل للأسفل بقليل فقط.

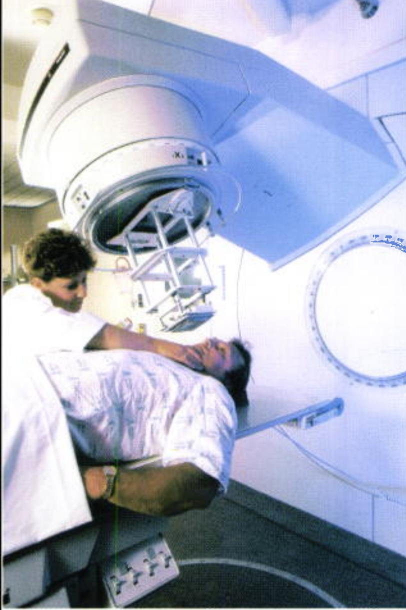
في ذلك المجال المغنطيسي المشير للأعلى، كل بروتون له حالتان كميتان محتملتان: الاصطفاف مع المجال (غزل للأعلى) أو ضد الاصطفاف (غزل للأسفل). ولأنالاصطفاف يقلل من الطاقة المغنطيسية الكامنة للبروتون، فهو الحالة الأرضية - أي الطاقة الأقل من الحالتين المحتملة، بينما الحالة غير المصطفة هي حالة الإثارة.

بوجود حالتيه المحتملة، أرضية ومثارة، يمكن للبروتون في المجال المغنطيسي أن يُظهر العديد من السلوكيات التي فحصناها عندما نظرنا إلى الذرات في قسم ١٤-٢. والأكثر أهمية أنه يمكن أن يواجه البروتون انتقالات إشعاعية بين حالتيه. يمكن لبروتون الحالة الأرضية أن يمتص فوتونا بينما يقوم بانتقال إشعاعي إلى حالته المثارة، ويمكن لبروتون حالة الإثارة أن يبعث فوتونا بينما ينتقل إلى حالته الأرضية.

في القسم ١٤-٢، رأينا أن ذرة معطاة يمكنها أن تمتص أو تبعث فوتونات معيّنة فقط، فوتونات تحمل المقدار الصحيح من الطاقة لنقل الذرة من حالة كمية إلى أخرى. على سبيل المثال، تكون لوحات الإعلان النيون حمراء لأن ذرات النيون لها مستويات متباعدة في الطاقة بمقدار طاقة الفوتونات الحمراء. بالمثل، يمكن لبروتون في المجال المغنطيسي أن يمتص أو يبعث فوتونات معيّنة فقط، أي فوتونات تحمل بالضبط المقدار الصحيح من الطاقة لنقل البروتون من حالة كمية إلى أخرى.

ولكن على خلاف ذرة النيون، والتي تتفاعل دائما مع الفوتونات الحمراء، يتفاعل البروتون في المجال المغنطيسي مع فوتونات تتفاوت في «اللون» وفقا لقوة المجال المغنطيسي. ذلك لأن الطاقة الفاصلة بين حالتي البروتون تتناسب مع المجال المغنطيسي المغمور فيه. ونتيجة لذلك، طاقة الفوتون المطلوبة لإحداث انتقالات إشعاعية بين حالتي البروتون هي أيضا تتناسب مع المجال المغنطيسي، وإذا تغيّر المجال، تتغيّر أيضا طاقة الفوتون. عندما يدخل مريض في المجال المغنطيسي القوّي لجهاز MRI (أشكال ١٢,٢,١٦ و١٣,٢,١٦)، فإن البروتونات

دو مارتن/صورة مؤسسة فوتو ريسرتشرز



شكل ١١,٢,١٦: تستخدم وحدة الإشعاع هذه معجلا خطيا لإنتاج جسيمات دون ذرية ذات طاقة عالية. تتخلل هذه الجسيمات بشكل عميق داخل المريض لتدمر الورم السرطاني. المعجّل الخطي ذاته مخفي عن النظر في غرفة تقع خلف هذه. يتم توجيه حزمته بواسطة مغنطيس في الذراع القابلة للدوران نحو بقعة معينة في المريض. تتحرك الذراع بشكل دوري أثناء العلاج بحيث تتقاطع حزمتها مع الورم من عدة اتجاهات مختلفة، وتسبب ضرراً أقل على الأنسجة السليمة المجاورة. تستخدم هذه الطريقة المتعددة الاتجاهات بشكل واسع أيضاً في العلاج بأشعة إكس وأشعة جاما.



شكل ١٢،٢،١٦: يضع جهاز MRI المريض في مجال مغنطيسي قوّي. يتفاوت هذا المجال مكانيا، بحيث تواجه البروتونات في المواضع المختلفة في جسم الإنسان مجالات مختلفة وتمتص فوتونات موجات راديو مختلفة.

في جسم المريض تستجيب للمجال ويتكون عدد زائد من البروتونات المصطفة. إن هذه البروتونات المصطفة الزائدة هي المهمة فقط في جهاز الـ MRI لأن التأثيرات التي تسببها البروتونات المتبقية، والتي هي مصطفة وغير مصطفة بالتساوي، تُلغي بعضها البعض. تكون البروتونات المصطفة الزائدة في حالتها الأرضية وهي التي يدرسها جهاز MRI.

يتفاعل جهاز MRI مع هذه البروتونات في الحالة الأرضية باستخدام فوتونات موجات الراديو - فوتونات لها طاقات مساوية للفرق في الطاقة بين حالاتها الأرضية والمثارة. يمكن للبروتونات أن تمتص وبالتالي تبعث هذه الفوتونات لموجة الراديو، ويمكنها أيضا أن تُظهر تشكيلة من التأثيرات المثيرة والمفيدة للتداخلات الكمية. إذا كانت جميع البروتونات في جسم المريض تواجه نفس المجال المغنطيسي، فإنها جميعا ستتفاعل مع نفس فوتونات موجة الراديو، ولكن جميع البروتونات لا تواجه نفس المجال. يقدم جهاز MRI تفاوتاً مكانياً طفيفاً في مجاله المغنطيسي. وبما أن المجال المغنطيسي مختلف بالنسبة للبروتونات المختلفة، فإن بعضاً منها فقط يمكنه التفاعل مع فوتونات موجة الراديو ذات طاقة محددة. إن هذا الاختيار في التفاعل هو الطريقة التي يحدد بها جهاز تصوير الرنين المغناطيسي البروتونات داخل المريض.

في أبسط أشكاله، يطبق جهاز MRI مجالاً مغنطيسياً متفاوتاً مكانياً على جسم المريض. يرسل بعد ذلك نبضات من موجات الراديو خلال المريض، ويلاحظ الموجات المعاد انبعاثها من البروتونات، وفي الغالب يستخدم نفس الهوائيات لبعث الموجات واستقبال صداها. وبما أن البروتون الذي يواجه المجال المغنطيسي الصحيح هو فقط الذي يمكن أن يتفاعل مع فوتون موجة راديو معيّن، فيمكن لجهاز MRI أن يحدّد مكان كل بروتون عن طريق الفوتونات التي يتفاعل معها. وبتغيير التفاوتات المكانية في المجال المغنطيسي وتعديل طاقات فوتونات موجة الراديو، يمكن لجهاز MRI أن يحدد تدريجيا البروتونات الموجودة في جسم المريض. يبني الجهاز خريطة دقيقة ثلاثية الأبعاد لذرات الهيدروجين. يعالج حاسوب هذه الخريطة، ويمكنه أن يعرض صور مقاطع عرضية للمريض من أي زاوية أو موقع.

تحقق من فهمك # ٧: مغنطيسات رئيسية

(للإجابة، انظر صفحة ٥٢٤)

تستخدم بعض أجهزة MRL الحديثة مجالات مغنطيسية قوية جدا. بينما يصبح المجال المغنطيسي للجهاز أكثر قوة، ماذا يجب أن يحدث لموجات الراديو المستخدمة في التفاعل مع البروتونات في المريض؟

تشارلز ثاتشر/ستون/صور جيتي



الصور الطبية SBHA /ستون/صور جيتي



شكل ١٣،٢،١٦: يدخل المريض على اليسار في المجال المغنطيسي القوّي لنظام التصوير بالرنين المغنطيسي (MRI). باستخدام التفاعلات بين الموجات الكهرومغنطيسية والبروتونات والتي تحدث في المجالات المغنطيسية، يُنتج جهاز MRI خريطة ثلاثية الأبعاد لذرات الهيدروجين في جسم المريض. جزء من هذه الخريطة، والذي يُظهر رأس المريض، موضح في الصورة التي على اليمين.

خاتمة الفصل السادس عشر

فحصنا في هذا الفصل بعض تطبيقات الفيزياء الحديثة. في الأسلحة النووية، فحصنا الانشطار النووي لكي نرى كيف يمكن استخدام التفاعلات التسلسلية لتحرير طاقة كامنة كهروستاتيكية مختزنة في الأنوية الكبيرة في ذرات اليورانيوم والبلوتونيوم. كما درسنا الاندماج النووي ووجدنا أنه عند التصاق أنوية الهيدروجين الصغيرة سوية، فإنها تحرّر طاقة كامنة مرتبطة بالقوة النووية. كما تعلمنا عن النظائر المشعة ونتاج الانفجار النووي.

في التصوير الطبي والإشعاع، تعلمنا كيف تُنتج أشعة إكس ولماذا تمر هذه الأشعة بسهولة أكثر خلال الأنسجة مقارنة بمرورها خلال العظام. رأينا كيف يمكن استخدام أشعة إكس في التصوير، وفحصنا استخدامات أشعة جاما في العلاج الإشعاعي. كما نظرنا في معجلات الجسيمات وختمنا الفصل بفحص التصوير بالرنين المغنطيسي.

تفسير: ورق متلَف بالإشعاع

تبهت الورقة لأن فوتونات الضوء فوق البنفسجي الموجودة في ضوء الشمس لها طاقة كافية لنقل الإلكترونات خارج المدارات التي تربط جزيئات الصبغة مع بعضها. عند ذلك تتفكك جزيئات الصبغة وتترك الورقة بلا لون. في بعض الحالات، تزيل فوتونات الضوء الإلكترونات تماما من جزيئات الصبغة. تلك العملية هي نفس عملية الأثر الكهروضوئي والتي تجعل من الممكن تمييز الأنسجة من العظام في التصوير بأشعة إكس.

ملخص الفصل

كيفية عمل الأسلحة النووية

تحرّر القنبلة الانشطارية طاقة نووية من خلال تفاعل تسلسلي في النظائر القابلة للانشطار لليورانيوم أو البلوتونيوم. في التفاعل التسلسلي، يحث كل انشطار - في المتوسط - انشطارا واحداً لاحقا على الأقل. يجب أن يتم تجميع كتلة فوق حرجة بسرعة لكي لا تنفجر القنبلة قبل أن تتمكن معظم أنويتها من الانشطار.
تستخدم القنبلة الاندماجية الحرارة من القنبلة الانشطارية لبدء عملية الاندماج في نظائر الهيدروجين الثقيلة – الديوتيريوم والتريتيوم. وبما أن التريتيوم له عمر نصف قصير، فيجب استبداله بشكل دوري. في بعض القنابل الاندماجية، يتكوّن التريتيوم أثناء الانفجار باصطدامات النيوترونات بالليثيوم.

كيفية عمل التصوير الطبي والإشعاع

بما أن أشعة إكس تمر بسهولة أكثر خلال الأنسجة مقارنة بمرورها خلال العظام، تكوّن أشعة إكس صوراً لظل عظام المريض. تنتج أشعة إكس عندما تتسارع إلكترونات ذات طاقة عالية بالقرب من أنوية معدن وعندما تقذف هذه الإلكترونات إلكترونات أخرى خارج ذرات المعدن.

يتم العلاج بالإشعاع باستخدام أشعة إكس وأشعة جاما ذات طاقة عالية لأنها تمر بسهولة أكبر خلال الأنسجة. إن هذه الموجات الكهرومغنطيسية تقتل خلايا الورم عن طريق إيداع طاقة في ذرات وجزيئات هذه الخلايا. في الغالب يتم الحصول على أشعة جاما من الأنوية المشعّة. يتم بعض العلاج الإشعاعي باستخدام جسيمات عالية الطاقة والتي تم إعطاؤها هذه الطاقة عن طريق معجلات الجسيمات.

يستخدم التصوير بالرنين المغنطيسي الطبيعة المغنطيسية لأنوية الهيدروجين (بروتونات) لتحديد ذرات الهيدروجين في جسم المريض. يوضع المريض في مجال مغنطيسي قوّي، وتميل البروتونات للاصطفاف مع هذا المجال. بعدها يستخدم جهاز التصوير موجات راديو لعكس اصطفاف هذه البروتونات. وبجعل المجال المغنطيسي متفاوتاً من مكان لآخر، يصبح الجهاز قادرا على تحديد البروتونات في جسم المريض. يسجل الحاسوب النتائج ويحللها حتى يمكنه تقديم صور مقطعية لذرات الهيدروجين في جسم المريض.

قوانين ومعادلات مهمة

١. الاضمحلال الأسي للأنوية والجسيمات المشعّة:
النسبة المتبقية من تعداد أصلي كبير لأنظمة مشعّة متماثلة تساوي ½ مرفوعا إلى أس الزمن المنقضي مقسوما على عمر النصف لتلك الأنظمة، أو (١،١،١٦)

$$\text{الكسر المتبقي} = \left(\frac{١}{٢}\right)^{\text{الزمن المنقضي}/\text{عمر النصف}}$$

تحقق من فهمك – الإجابات

١٦-١ الأسلحة النووية

١. يعتمد ذلك كلية على النظرية ومدى مقارنتها لما يحدث في العالم الحقيقي.
لماذا: لقد تم تشكيل العديد من النظريات لتفسير العالم من حولنا. كل من هذه النظريات هي محاولة لوصف بعض السلوكيات المعيّنة في كوننا بدلالة قوانين أو آليات متعددة. لكن إلى أن يتم اختبار النظرية بمقارنتها بعناية بالنظام الذي تحاول تفسيره، فإنه لا يمكنك أن تعرف هل هي صحيحة أم لا. بعض النظريات يتم إثبات صحتها، وأخرى يتم إثبات خطئها، ويظل الكثير في حالة عدم اليقين. إن النظرية النسبية ونظرية الفيزياء الكمية قد تم إثبات صحتها منذ زمن بعيد، على الرغم من أن هناك احتمال أن تكون جزءاً فقط من نظرية أكثر كمالا.

٢. تم تخزينها على شكل طاقة كهروستاتيكية كامنة في التنافر بين البروتونات.
لماذا: على الرغم من أنها عادة تُسمّى طاقة نووية، إلا أن معظم الطاقة المختزنة في الأنوية المشعّة هي في الحقيقة طاقة كهروستاتيكية كامنة. يتطلّب تجميع نواة ضخمة من جسيمات موجبة الشحنة مقداراً كبيراً من الشغل ضد القوى الكهروستاتيكية، وهذا الشغل المخزون هو الذي يتحرّر عند اضمحلال النواة.

٣. سوف تستهلك طاقة.
لماذا: لدمج نواتين صغيرتين وتكوين نواة يورانيوم، ستحتاج لدفع النواتين سوية بقوة كبيرة لأنها تحتوي على بروتونات كثيرة. ستحتاج إلى القيام بشغل كبير لتقريب هاتين النواتين من بعضهما البعض لكي تقوم القوة النووية بربطهما. إن الطاقة التي استثمرتها في هذه النواة الجديدة هي نفس الطاقة المحرّرة منها عندما تنشطر.

٤. قبل أن يتلامسا، سيحدث تفاعل تسلسلي.
لماذا: بمجرد أن يقترب نصفا الكرة بما يكفي لأن يحث كل انشطار انشطاراً واحداً لاحقاً في المتوسط، فإن تفاعلاً تسلسلياً سيحدث. ستكون قد جمّعت كتلة حرجة. ستبدأ درجة حرارة نصفي الكرة بالارتفاع أكثر وأكثر وفي نهاية الأمر سينصهرا أو ينفجرا. بما أنهما سينفجران قبل أن تتمكن معظم الأنوية من الانشطار، فإن أي انفجار سيكون صغيرا نوعا ما، ولكنك ستعاني من إصابة إشعاعية كبيرة. إن مثل هذه الإصابة قتلت لويس سلوتن أثناء مشروع مانهاتن.

٥. تتنافر البروتونات في أنوية الهيدروجين مع بعضها البعض بقوة كبيرة عند المسافات القصيرة. يجب أن تتحرك بسرعة عالية بطاقة حرارية كبيرة لكي تتلامس.
لماذا: في الغاز، تأخذ الطاقة الحرارية شكل الطاقة الحركية. كلما ازدادت سخونة الغاز، زادت سرعة حركة الجسيمات. فعند درجة حرارة 100 مليون مئوية ، تتحرك أنوية الهيدروجين بسرعة عالية بحيث يمكنها التغلب على تنافرها الكهروستاتيكي فتتلامس. عند التلامس، تجذبها القوة النووية نحو بعضها البعض وتندمج.

٦. يدخل اليود ^{131}I إلى جسمك ويعرّضك لإشعاع، خاصة أثناء الأسابيع الأولى قبل أن يكون معظمه قد اضمحل.
لماذا: لا يستطيع جسمك أن يميّز بين ^{127}I و ^{131}I لأنهما متماثلان كيميائيا. بما أن جسمك يستخدم اليود في عملياته، فإن أي يود ^{131}I تتناوله من المحتمل أن يُصبح جزءا من مخزون اليود في جسمك. خلال الثمانية أيام التالية، سيضمحل حوالي نصف هذا اليود ويعرّضك لإشعاع. المتبقي من ^{131}I مشعّ أيضا، ونصف هذا المقدار سيضمحل في الأيام الثمانية التالية. وهكذا بعد 16 يوم، سيبقى ربع الكمية الأصلية فقط، وبعد 24 يوم سيظل ثُمن الكمية الأصلية فقط وهكذا.

١٦-٢ التصوير الطبي والإشعاع

١. الضوء تحت الأحمر من الفتيلة الساخنة.
لماذا: الضوء تحت الأحمر وأشعة إكس كلاهما من أشكال الإشعاع الكهرومغنطيسي. كل ما يميز بينهما هو تردداتهما وأطوالهما الموجية، وطاقة فوتوناتهما. حزمة الإلكترونات في أنبوب المغنطرون هي أيضا شكل من أشكال الإشعاع، لكنها تتضمّن جسيمات مادية وليس موجات كهرومغنطيسية.

٢. بما أن الجسيم الذي يسير في دائرة يتسارع، فإنه يبعث موجات كهرومغنطيسية. في هذه الحالة، تلك الموجات هي أشعة إكس.
لماذا: إن الجسيم المشحون المتسارع بسرعة سيبعث شعاع إكس، سواء كان يتسارع حول نواة ذرة ثقيلة أو حول حلقة معجّل جسيمات. في المعجّل، تُسمّى أشعة إكس هذه بإشعاع سنكروتروني. إن الإشعاع السنكروتروني مفيد في البحث العلمي والصناعة وكثيراً ما يُعزّز بشكل تعمدي بإضافة مغنطيسات خاصة لحلقة المعجّل.

٣. الإلكترونات في ذرة ألومنيوم ضعيفة الترابط بحيث تقل احتمالية امتصاصها لفوتونات أشعة إكس العالية الطاقة من خلال الأثر الكهروضوئي.
لماذا: مثل الذرات الصغيرة في الأنسجة الحيوية، نادراً ما تستخدم ذرات الألومنيوم الأثر الكهروضوئي لامتصاص أشعة إكس عالية الطاقة. إن هذه النتيجة تجعل من الممكن استخدام أغشية رقيقة من الألومنيوم كنوافذ ومرشحات لمصادر أشعة إكس.

٤. حوالي 2,000,000,000eV.

لماذا: للبروتون كتلة هي 2000 ضعف كتلة الإلكترون، فإنتاج زوج بروتون – بروتون مضاد سيحتاج طاقة هي حوالي 2000 ضعف 1,000,000eV والتي هي الطاقة المطلوبة لإنتاج زوج إلكترون – بوزيترون.

٥. لن تستطيع القنينة أن تحصر النيوترينوات لأنها بالكاد تتفاعل معها.

لماذا: بسبب أن النيوترينوات لا تخضع إلا للجاذبية والقوة النووية الضعيفة، فإن القنينة لن تستطيع حصرها لزمن طويل. في الحقيقة، أنت منغمر في النيوترينوات الصادرة من الشمس دائماً دون أن تلاحظ ذلك. فهي شائعة مثل التراب ولا يمكنك القيام بأي شيء بها على أية حال.

٦. تسير الحزمة بسرعة الضوء تقريباً، لذا، فإن سرعتها بالكاد تتغيّر بينما تزيد طاقتها.

لماذا: إذا كانت الحزمة تزداد سرعة مع كل جولة خلال التجاويف، فإنها لن تظل متزامنة مع المجالات الكهربائية المنعكسة داخلها. لكن سرعة الحزمة هي ثابتة تقريباً بمجرد أن تقترب من سرعة الضوء بحيث يمكنها السير خلال التجاويف مرة بعد أخرى دون أي مشكلة.

٧. على كل فوتون موجة راديو أن يحمل مزيدا من الطاقة (يجب أن يكون لموجات الراديو ترددات أعلى).

لماذا: كلما زادت شدة المجال المغنطيسي المغمورة فيه البروتونات، زادت الطاقة التي تفصل بين حالتي البروتون. يجب أن يستخدم جهاز MRI تردداً أعلى، أي موجات راديو ذات طاقة أكبر لإحداث انتقالات إشعاعية بين هاتين الحالتين. هناك العديد من المزايا لاستخدام مجالات مغنطيسية قوية جدا، منها انخفاض في الضوضاء ودقة في الصورة. لكن المجالات المغنطيسية لأجهزة MRI الحديثة قوية جدا إلى حد أنه يمكنها مسح مغنطيس بطاقات الائتمان من عبر الغرفة ونزع الأجسام الحديدية من جيوب قميصك.

دقق في أرقامك – الإجابات

١٦-١ الأسلحة النووية

١. الكسر المتبقي من كربون 14 الأصلي يجب أن يكون حوالي 0.886.

لماذا: وفقا لمعادلة (١٦،١،١)، الكسر المتبقي من أنوية كربون 14 بعد 1001 سنة يجب أن يكون:

$$\text{الكسر المتبقي} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1001\text{سنة}/57530\text{سنة}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{0.1747} = 0.886$$

يشير هذا الكسر إلى أن الخيوط في هذا اللباس تأتي من نباتات أو حيوانات ماتت قبل 1001 سنة تقريبا، بالرغم من أنك لا تستطيع معرفة متى تم نسج هذا القماش بالضبط. إيجاد كسر أكبر سيثبت أن عمر اللباس أقل من 1001 سنة.

تمارين

١. النحاس الطبيعي له نظيران، ^{63}Cu و ^{65}Cu. ما الفرق بين ذرتي هذين النظيرين؟

٢. لماذا من الصعب جدا فصل نظيري النحاس، ^{63}Cu و ^{65}Cu؟

٣. إذا أضاف تفاعل نووي نيوتروناً إضافيًا واحداً لنواة ^{57}Fe (نظير مستقر للحديد)، فإنه سينتج ^{58}Fe (نظير مستقر آخر للحديد). هل هذا التغيير في النواة سيؤثر على عدد وترتيب الإلكترونات في الذرة المبنية حول هذه النواة؟ لمَ أو لمَ لا؟

٤. إذا أضاف تفاعل نووي بروتوناً إضافيًا واحداً إلى نواة ^{58}Fe (نظير مستقر للحديد)، فإنه سينتج ^{59}Co (نظير مستقر للكوبالت). هل هذا التغيير في النواة سيؤثر على عدد وترتيب الإلكترونات في الذرة المبنية حول هذه النواة؟ لمَ أو لمَ لا؟

٥. عندما تلتصق نواتان متوسطتا الحجم ببعضهما أثناء تجربة في معمل فيزياء نووية، فالنتيجة في العادة هي نواة كبيرة بنيوترونات قليلة تجعلها غير مستقرة. تتفكك النواة عما قريب. لماذا يمكن لنيوترونات أكثر أن تجعلها مستقرة؟

٦. من المحتمل أن تضمحل النواة الكبيرة في تمرين ٥ باضمحلال ألفا. ما الذي يخرج من النواة أثناء اضمحلال ألفا ولماذا يقلل هذا الاضمحلال من الطاقة الكامنة الكلية للنواة؟

٧. عندما تنقسم نواة كبيرة إلى نصفين أثناء تجربة في معمل فيزياء نووية، فالنتيجة في العادة هي نواتان متوسطتا الحجم بها نيوترونات كثيرة تجعلها غير مستقرة. تتفكك هذه الأنوية في نهاية الأمر. لماذا لا تحتاج هذه الأنوية الصغيرة لنفس النيوترونات الكثيرة التي استقبلتها من النواة الأصلية؟

٨. من المحتمل أن إحدى الأنوية المتوسطة الحجم في تمرين ٩ ستخضع لاضمحلال بيتا. ما الذي يخرج من تلك النواة أثناء اضمحلال بيتا وماذا يحدث للنواة نتيجة لذلك؟

٩. لا يمكن للضوء أن يتخلل في البلوتونيوم ولو حتى مليمتراً واحداً، فلماذا يستطيع النيوترون أن يسير عدة سنتيمترات في البلوتونيوم؟

١٠. لماذا من الصعب أو المستحيل صناعة قنابل نووية صغيرة جدا؟

١١. فسّر إستراتيجية وضع مواد ذات إشعاعية عالية في مخزن لعدة سنوات

كطريقة لجعلها أقل خطرا. لن ينفع ذلك مع السموم الكيميائية، فلماذا ينفع مع المواد المشعّة؟

١٢. عندما يوزع نتاج انفجار نووي نظائر مشعّة على منطقة ما، لماذا يكون من المستحيل تقريباً فصل العديد من هذه النظائر المشعة من التربة؟

١٣. إن حرق السموم الكيميائية في لهب غاز يجعلها في الغالب غير ضارة. لماذا لا يمكن لهذه الطريقة أن تجعل المواد المشعّة أقل خطورة؟

١٤. تمتص مراهم الحماية من الشمس الضوء فوق البنفسجي بينما تسمح للضوء المرئي بالمرور. لماذا تقلل هذه الطبقة من احتمال حدوث تلف كيميائي أو جيني لخلايا جلدك؟

١٥. لماذا من المهم إبقاء الطعام والأدوية بعيدا عن ضوء الشمس المباشر، حتى عندما لا يكون هناك خطر في تسخينها أكثر من اللازم؟

١٦. لماذا تعبأ العديد من الأدوية في حاويات لونها أصفر ضارب للحمرة والتي تحجب الضوء فوق البنفسجي؟

١٧. كثيراً ما تعرض المتاحف مخطوطات أثرية ثمينة تحت ضوء أصفر خافت. لماذا لا تستخدم ضوءاً أبيض؟

١٨. إن النظائر المشعة الأكثر إقلاقاً في نتاج الانفجار النووي هي التي لها أعمار نصف بين عدة أيام وعدة آلاف من السنوات. لماذا تشكّل النظائر المشعة التي لها أعمار نصف أقصر بكثير أو أطول بكثير مشكلة أصغر؟

١٩. إن النظائر المشعة الأكثر إقلاقاً في النفايات النووية هي التي لها أعمار نصف بين عدة سنوات وعدة مئات من آلاف السنوات. فسّر ذلك.

٢٠. يمكن لفنيّ أشعة إكس أن يُعدّل طاقة فوتونات أشعة إكس التي ينتجها الجهاز بتغيير الهبوط الفولطي بين مهبط أنبوب أشعة إكس ومصعد . فسّر ذلك.

٢١. الرصاص، بإلكتروناته الـ 82 لكل ذرة، هو ماص ممتاز لأشعة إكس. لماذا؟

٢٢. الشحنات الكهربائية محفوظة تماما في كوننا، بمعنى أن محصلة الشحنة في نظام معزول لا يمكن أن تتغيّر. لماذا لا يغير إنتاج زوج إلكترون - بوزيترون في مريض ما من محصلة شحنة المريض؟

٢٣. أيهما له كتلة أكبر: البوزيترون أو البروتون المضاد؟

٢٤. يختلف التصوير بالرنين المغنطيسي عن التصوير المقطعي المحوسب من حيث أنه لا يشتمل على «أشعة مؤينة». ما هو الإشعاع الكهرومغنطيسي المستخدم في أجهزة MRI ولماذا لا يمكن لفوتونات هذا الإشعاع إزالة الإلكترونات من الذرات وتحويل تلك الذرات إلى أيونات؟

٢٥. التصوير بالرنين المغنطيسي ليس جيّدا في الكشف عن العظام. لمَ لا؟

٢٦. لا يُسمح للمعادن الممغنطة مثل الحديد والفولاذ بتواجدها بالقرب من جهاز التصوير بالرنين المغنطيسي. هذا القانون هو من جانب احتياط للسلامة لأن هذه المعادن الممغنطة ستنجذب للجهاز. لكن من جانب آخر فإن المجالات المغنطيسية من هذه المعادن الممغنطة ستفسد عملية التصوير. لماذا سيُفسد وجود مجالات مغنطيسية إضافية داخل جهاز التصوير مقدرته على تحديد موقع بروتونات معينة داخل جسم المريض؟

٢٧. لماذا تؤثر قوة المجال المغنطيسي المستخدم في جهاز MRI على تردد موجات الراديو المستخدمة للكشف عن البروتونات؟

٢٨. كلما زادت شدة المجال المغنطيسي المستخدم في جهاز MRI، زادت نسبة البروتونات التي تصطف مع المجال. لماذا يجعل هذا التزايد في الاصطفاف من السهل لجهاز جهاز MRI أن يدرس البروتونات؟

مسائل

١. جاليوم 67 (^{67}Ga) هو نظير مشعّ له عمر نصف مقداره 3.26 يوم. يستخدم الجاليوم 67 في العلاج النووي لإيجاد الالتهابات والأورام. ويمكن الكشف عن تجمعات ^{67}Ga في أنسجة المريض بالبحث عن أشعة جاما التي يبعثها عند اضمحلاله. في العادة، يبدأ أخصائي الأشعة بالبحث عن ^{67}Ga بعد 48 ساعة من إدخاله إلى المريض. ما مقدار الكسر المتبقي من ^{67}Ga الأصلي بعد 48 ساعة؟

2. بعد أسبوعين من إدخال ^{67}Ga في جسم المريض (مسألة ١)، ما مقدار الكسر المتبقي من أنوية ^{67}Ga؟

3. التكنيتيوم 99 (^{99}mTc) هو نواة مشعّة لها عمر نصف مقداره 6.03 ساعات. يستخدم ^{99}mTc في العلاج النووي لتتبع المسارات الحيوية. نواة ^{99}mTc هي في الواقع حالة مثارة من نواة ^{99}Tc والانتقال الإشعاعي ^{99}mTc → ^{99}Tc يبعث شعاع جاما. شعاع جاما هذا يُظهر أين كان موقع النواة عند اضمحلالها. إذا بدأ فنّي الأشعة بالبحث عن ^{99}mTc بعد أربع ساعات من إدخاله لجسم المريض، ما هو مقدار الكسر المتبقي من أنوية ^{99}mTc؟

٤. بعد أن تبعث نواة ^{99}mTc شعاع جاما (مسألة 3)، تُصبح نواة ^{99}Tc. ^{99}Tc مشعّ أيضا، بعمر نصف مقداره 213,000 سنة، ويضمحّل إلى ^{99}Ru. بعد أسبوعين من إدخال ^{99}mTc إلى المريض، أي نسبة منه مازالت ^{99}mTc؟ أي نسبة منه هي ^{99}Tc؟ أي نسبة منه هي ^{99}Ru؟

٥. في حين معظم أنوية البوتاسيوم الطبيعي مستقرة ^{39}K (93.3 ٪) أو ^{41}K (6.7 ٪)، فإن حوالي 0.0117 % هي أنوية ^{40}K المشعّة والتي لها عمر نصف 1.26 بليون سنة. أي نسبة من جميع أنوية البوتاسيوم في جسمك ستخضع لاضمحلال إشعاعي في السنة القادمة؟

٦. إذا كنت قلقا من إشعاعية ^{40}K (مسألة ٥) وأردت أن تنتظر حتى يضمحل 99 ٪ من ^{40}K الموجود في البيئة، فكم يجب أن تنتظر؟

ملحق أ

أ - المتجهات

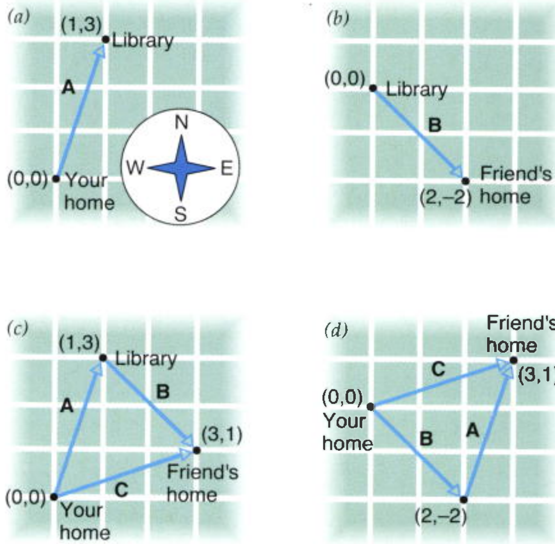
إن العديد من الكميات الفيزيائية هي متجهات، بمعنى أن لها مقادير (كميات) واتجاهات. من ضمن هذه الكميات المتجهة الموقع، والسرعة، والتسارع، والقوة، والعزم، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية، والمجالات الكهربائية والمغنطيسية. من هذه الكميات المتجهة، قد يكون الموقع أسهلهم في التصوّر: أنت تحدّد موقع جسم بتمثيله بمتجه لموقعه - أي بعده واتجاهه من نقطة مرجعية. على سبيل المثال، يمكنك أن تحدّد موقع المكتبة بالنسبة لمنزلك بإعطاء كل من بُعدها عن منزلك (لنقُل، 3.162km أو 1.965mile) واتجاهها من منزلك (18.43° شرق الشمال). متجه الموقع يشمل كل المعلومات التي سيحتاجها شخص ما للسير من منزلك إلى المكتبة.

في الرسوم التوضيحية، مثل الشكل (أ)، تُرسم الكميات المتجهة كأسهم. يشير طول كل سهم لمقدار المتجه، بينما يشير اتجاه السهم لاتجاه المتجه. افترض أنك تسكن في مدينة بشوارع رئيسية متجهة شرق - غرب وشمال - جنوب يفصل بينها 1km. يوضّح شكل (أ) أربعة مناظر جوية لمدينتك. المتجه A في الشكل (أ - ١) يوضح موقع المكتبة بالنسبة لمنزلك. يبدأ المتجه من منزلك وينتهي عند المكتبة، بذلك يشير لكل من مقدار واتجاه موقع المكتبة.

لننظر لمتجه موقع آخر. يبدأ المتجه B في الشكل (أ - ٢) من المكتبة وينتهي عند منزل صديقك. يوضح هذا المتجه موقع منزل صديقك بالنسبة للمكتبة وطوله 2.828km ويشير إلى 45° شرق الجنوب. إذا كنت في المكتبة، فإنه يمكنك استخدام هذا المتجه لإيجاد منزل صديقك.

لكن كيف يمكنك أن تذهب من منزلك إلى منزل صديقك؟ للقيام بهذه الرحلة، يجب أن تجمع متجهين: أولا تتبع متجه A من منزلك إلى المكتبة ثم تتبع متجه B من المكتبة إلى منزل صديقك. هذه الرحلة المجتمعة موضحة في المسار العلوي في الشكل (أ - ٣). لكنك أيضاً يمكنك الذهاب مباشرة من منزلك إلى منزل صديقك باتباع متجه جديد في الشكل (أ - ٣) - متجه C. هذا المتجه الذي بين منزلك ومنزل صديقك هو مجموع المتجهين A و B وطوله 3.162km ويشير بزاوية ١٨,٤٣٥ شمال الشرق. باستخدام الأحرف الغامقة للإشارة إلى أن A و B و C متجهات، يمكننا كتابة A + B = C، بمعنى أن المتجه C هو مجموع المتجهين A و B.

هناك مسار آخر مثير من منزلك إلى منزل صديقك موضّح في الشكل (أ - ٤): تسير أولا على طول المتجه B ثم على طول المتجه A. على هذا المسار، ستصل لمنزل صديقك دون زيارة المكتبة. الجزء الأول من هذه الرحلة سيأخذك لمنطقة جديدة، لكن الجزء الثاني سيصلك لمنزل صديقك. جمع المتجهين B و A لا يزال المتجه C،



شكل أ: أربعة مناظر جوية لمدينتك، توضّح الشوارع الرئيسية شمال - جنوب وشرق - غرب والتي يفصل بينها 1km. (1) للذهاب من منزلك إلى المكتبة، يجب أن تسير 3.162km في الاتجاه 18.43° شرق الشمال - المتجه A. (2) للذهاب من المكتبة إلى منزل صديقك، يجب أن تسير مسافة 2,828 km في اتجاه 45° شرق الجنوب - المتجه B. (3) يمكنك الذهاب من منزلك لمنزل صديقك إما بالذهاب إلى المكتبة أولا على طول المتجه A ثم الذهاب لمنزل صديقك على طول المتجه B، أو يمكنك السير مباشرة على طول المتجه C، والذي هو مجموع المتجهين A و B. (4) كما يمكنك الوصول لمنزل صديقك بالذهاب أولا على طول المتجه B ثم على طول المتجه A. مجموع هذين المتجهين مازال المتجه C. لكنك لن تمر بالمكتبة في تلك الرحلة.

أو B + A = C. وهكذا، فإن جمع المتجهات بأي ترتيب سيُعطي نفس المجموع. في حين يمكنك تقدير مجموع متجهين عن طريق رسم أسهم على ورقة، إلا أن الحصول على مجموع دقيق يتطلب بعض التفكير. من غير المحتمل أن يعطيك جمع مقداري المتجهين مقدار متجه مجموعهما، وجمع اتجاهيهما غير معقول. لجمع متجهين، من المفيد تحديدهما بشكل آخر: كمركباتهما في اتجاهين أو ثلاثة اتجاهات متعامدة بالنسبة لبعضها. في المثال الحالي للسير في المدينة، كل ما نحتاجه هو اتجاهان متعامدان. إذا كان الارتفاع مهماً أيضا، سنحتاج ثلاثة اتجاهات متعامدة.

للاتجاهين المتعامدين اللذين نحتاجهما في المدينة، دعنا نختار الشرق والشمال.

عندها يمكننا تحديد متجه A كمركبته نـحو الشرق ومركبته نـحو الشمال. مركبته الشرقية هي 1km ومركبته الشمالية 3km، لذا، فإن المتجه A، أي موقع المكتبة بالنسبة لمنزلك، هو 1km إلى الشرق و 3km إلى الشمال.

هذا الشكل الجديد للمتجه A، زوج من المسافات، هو في الغالب أكثر مناسبة من الشكل القديم، مسافة واتجاه. إذا ذهبت إلى المكتبة بالسير 3.162km في اتجاه 18.43o شرق الشمال، فإنك ستضطر أن تمر خلال العديد من المباني الأخرى والحدائق. السير إلى المكتبة بالسير 1km شرقاً و 3km شمالاً يسمح لك بالسير على أرصفة الطريق.

إذا حددّنا موقع منزلك كـ 0km شرقاً و0km شمالاً، فإن موقع المكتبة هو 1 km شرقاً و3km شمالاً. هذان الموقعان معلّمان في الشكل (أ – ١) بـ (٠،٠) و(٣،١) ، على التوالي. الرقم الأول بين القوسين هو المسافة شرقاً، مقاسة بالكيلومترات، والرقم الثاني هو المسافة شمالاً، بالكيلومترات أيضا.

للذهاب من المكتبة إلى منزل صديقك، يجب أن تذهب 2km شرقاً و2km جنوباً. هذا هو الشكل الجديد للمتجه B. بما أن الموقع الجنوبي له مركبة سالبة في الاتجاه الشمالي، فإن موقع منزل صديقك بالنسبة للمكتبة هو 2km شرقاً و2km- شمالاً. في الشكل (أ – ٢)، المكتبة هي على الموقع (0,0) ومنزل صديقك عند (2,2-).

الآن يكون جمع هذين المتجهين A و B سهلاً نسبياً. للذهاب من منزلك إلى منزل صديقك عن طريق المكتبة، يجب أن تتحرك شرقا أولا 1km ثم 2km فيكون المجموع 3km، ويجب أن تتحرك شمالا 3km ثم 2km- فيكون المجموع 1km. وهكذا، فإن موقع منزل صديقك بالنسبة لمنزلك، المتجه C، هو 3km شرقاً و1km شمالاً. في الشكل (أ – ٣)، منزلك عند (0,0) ومنزل صديقك عند (3,1).

وبالمثل، يمكنك الذهاب من منزلك إلى منزل صديقك باتباع المتجه B أولا ثم المتجه A، كما هو موضّح في الشكل (أ – ٤). ستأخذك هذه الرحلة خلال مناطق غير معروفة، لكنك ستصل إلى المكان الصحيح. سوف تتحرك أولا نـحو الشرق 2km ثم 1 km، وسوف تتحرّك شمالا 2km- أولا ثم 3km. في النهاية، ستكون على بعد 3 km شرقاً و1km شمالاً من منزلك، وهو مكان منزل صديقك. وبالتالي فإن مجموع المتجهين B وA مازال المتجه C.

كما ترى، المتجهات مفيدة في تحديد الكميات الفيزيائية في عالمنا الثلاثي الأبعاد. عندما تواجه متجهات، تذكّر أن اتجاهاتها هي بنفس أهمية مقاديرها وأنه يجب أخذ هذه الاتجاهات في الاعتبار عندما تجمع متجهين سوية.

ملحق ب

الوحدات وتحويلها

عندما تعود من رحلة تخيم وتبدأ في وصفها لأصدقائك، هناك عدد من الكميات الفيزيائية التي قد تجدها مفيدة أثناء حديثك. المسافة، والوزن، ودرجة الحرارة، والزمن مهمة في الحياة اليومية بنفس أهميتها في المعمل. وعندما تشرح لأصدقائك المسافة التي صعدتها على الجبل، وثقل الحقيبة التي حملتها، والبرودة التي كان عليها الطقس، والزمن الذي استغرقته الرحلة، فإنك ستضطر أن تربط هذه الكميات بوحدات قياسية وإلا لن يقدّر أصدقاؤك صعوبة الرحلة.

معظم الكميات الفيزيائية ليست أعداداً بسيطة مثل 7 أو 2.9. بدلا من ذلك، لها وحدات مثل الطول أو الزمن وتُحدّد كمضاعفات من وحدات قياسية متعارف عليها على نحو واسع مثل الأمتار أو الثواني. عندما تقول أن ارتفاع الباب 3m، فأنت تقارن ارتفاع الباب بالمتر، وهو الوحدة القياسية المتعارف عليها للطول. بهذه المقارنة، يمكن لمعظم الناس تحديد ارتفاع الباب، حتى وإن لم يروه.

لكن المتر ليس مألوفاً لكل الناس؛ يفضّل الكثير من الأشخاص قياس الطول بمضاعفات وحدة قياسية أخرى – القدم. هؤلاء الأشخاص قد يريحهم أن يعرفوا أن ارتفاع الباب هو 9.8 قدم. هاتان الكميتان، 3m و 9.8 ft، هما نفس الطول.

إن تحديد ارتفاع الباب بالأقدام لا يتطلب قياساً جديداً لأنه يمكننا تحويل الطول بالأمتار إلى طول بالأقدام. للقيام بهذا التحويل، يجب علينا أن نعرف كيفية التعبير عن طول معيّن في كلا الوحدتين. أي طول سيجزئ. على سبيل المثال، يوضّح الجدول (ب – ١) أن 1 قدم هو نفس طول0.30480 متر. بسبب هذه المساواة نحن نعلم أن المعادلة التالية صحيحة:

1=10.30480

يمكننا ضرب 3m، أي ارتفاع الباب، بهذا الشكل من العدد 1 ونحصل على ارتفاع الباب بوحدة الأقدام:

3 × 10.30480=9.8425

لاحظ أن الوحدات الأصلية، الأمتار، تُلغى ويتم استبدالها بالوحدات الجديدة، الأقدام. بما أننا علمنا ارتفاع الباب لدقة خانتين عشريتين فقط في الأمتار، فلا يمكننا التعبير عن ارتفاع الباب لأكثر من دقة خانتين عشريتين في الأقدام. فنقرّب النتيجة إلى 9.8 قدم.

يمكنك تغيير وحدات أي كمية فيزيائية عن طريق ضرب تلك الكمية بشكل من العدد 1. يجب أن تكوّن هذا الـ 1 بقسمة الوحدات الجديدة على الوحدات القديمة، بحيث يكافئ عدد الوحدات الجديدة في البسط عدد الوحدات القديمة في المقام. يمكنك الحصول على هذه الأزواج من الكميات المتكافئة من الجدول (ب – 1). عندما تقوم بعملية الضرب هذه، فإن الوحدات القديمة ستُلغي بعضها البعض وسيبقى لك الكمية الفيزيائية معبرا عنها بالوحدات الجديدة.

ملاحظة أخيرة عن الوحدات: عندما تستخدم كميات فيزيائية في عملية حسابية، تأكد من إبقاء الوحدات خلال العملية. فهي مهمة في العملية الحسابية كأهميتها في أي مكان آخر. قد تلغي بعض الوحدات بعضها، لكن من الراجح أن يظل في الناتج بعض الوحدات، وهذه الوحدات يجب أن تكون مناسبة لنوع النتيجة التي تتوقعها. إذا كنت تتوقع طولا، فإن وحدة نتيجتك يجب أن تكون أمتاراً أو أقداماً أو أي وحدة قياسية أخرى للطول. إذا كانت الوحدات التي حصلت عليها هي ثوانٍ

أو كيلوجرامات، فقد أخطأت في الحسابات.

جدول ب.١: تحويل الوحدات

الوحدة في النظام العالمي SI	التحويلات
١. تسارع	meter/second^2 أو m/s^2
	1foot/second^2 = 0.30480 m/s^2
٢. زاوية	راديان
	1degree (1°) = 0.017453 radian
٣. مساحة	meter^2 أو m^2
	foot^2 = 0.092903 m^2
	1inch^2 = 6.4516 × 10^{-4} m^2
٤. كثافة	kilogram/meter^3 أو kg/m^3
	1pound/foot^3 = 16.018 kg/m^3
٥. طاقة	joule أو J
	1Btu = 1054.7 J
	1calorie, thermochemical = 4.1840J
	1electron volt (1eV) = 1.6022 × 10^{-19} J
	1foot-pound = 1.3558J
	1kilocalorie (food Calorie) = 4186.8 J
	1kilowatt-hour = 3600,000 J
٦. قوة	newton أو N
	1pound = 4.4482 N
٧. طول	meter أو m
	1angstrom (1 Å) = 10 $^{-10}$ m
	1centimeter (1 cm) = 0.01 m
	1fermi (l fm) = l0 $^{-15}$m
	1foot = 0.30480 m
	1inch = 0.02540m
	1kilometer (1 km) = 1000 m
	1light-year = 9.4606 × 10^{15} m
	1micron (1 µm) = 10^{-6} m
	1mil = 2.5400 × 10^{-5} m
	1mile = 1609.3 m
	1millimeter (1 mm) = 0.001 m
	1nanometer (1 nm) = l0^{-9} m
	1picometer (1 pm) = 10^{-12} m
٨. كتلة	kilogram أو kg
	1gram(l g) = 0.001kg
	1metric ton = 1000 kg
	1pound (at the earth›s surface) = 0.45359 kg
	1slug = 14.594 kg
٩. قدرة	watt أو W
	1Btu/hour = 0.29307 W
	1horsepower = 745.70 W
١٠. ضغط	pascal أو Pa
	1atmosphere = 101,325 Pa
	1millimeter of mercury (1 torr) = 133.32 Pa1
	pound/inch^2 (1 psi) = 6894.8Pa
١١. درجة حرارة	degree Celsius أو C° أو Kelvin أو K
	بما أن درجة الحرارة تُعطى في ثلاث وحدات مألوفة، C° وK و F°، وهي ليست مضاعفات من بعضها، فيجب استخدام علاقات خاصة للتحويل بينها:
	Temperature in °C = 5/9 · (temperature in °F - 32)
	Temperature in °C = (temperature in K -273.15)
	Temperature in K = (temperature in °C + 273.15)
١٢. زمن	second أو s
	1day = 86,400 s
	1femtosecond (1 fs) = 10^{-15} s
	1hour = 3600 s
	1microsecond (1µs) = 10^{-6} s
	1millisecond (1 ms) = 0.001 s
	1minute = 60 s
	1nanosecond (1 ns) = 10^{-9} s
	1picosecond (1 ps) = 10^{-12} s
١٣. عزم دوراني	newton·meter أو N·m
	1inch-pound = 0.11298 N·m
	1foot-pound = 1.3558 N·m
١٤. سرعة	meter/second أو m/s
	1foot/second = 0.30480 m/s
	1kilometer/hour (1 km/h) = 0.27778 m/s
	1knot = 0.51444 m/s
	1mile/hour (1 mph) = 0.44704 m/s
	1mile/hour (1 mph) = 1.6093 km/h
١٥. حجم	meter^3 أو m^3
	1cup = 2.3659 × l0^{-4} m^3
	1fluid ounce = 2.9574 × 10^{-5} m^3
	1foot3 = 0.028317 m^3
	1gallon = 0.0037854 m^3
	1liter (1 L) = 0.001 m^3
	1milliliter (l mL) = 10^{-6} m^3

المصطلح العربي	المصطلح الانجليزي	التعريف
اتجاه	Direction	الخط أو المسار الذي يتحرك عليه شيء ما، أو يقصد أن يتحرك عليه، أو يشير نحوه أو يواجهه.
الاتزان	Equilibrium	حالة جسم يكون تأثير محصلة القوة (أو محصلة عزم الدوران) عليه صفرا. الجسم الساكن أو المتحرك بحركة منتظمة هو في حالة اتزان.
اتزان الطور	Phase Equilibrium	حالة يتواجد فيها سوية طوران لمادة بشكل مستقر، لا يكبر أي منهما على حساب الآخر.
اتزان حراري	Thermal Equilibrium	حالة لا يتدفق فيها أي حرارة في النظام لأن جميع الأجسام في النظام عند نفس درجة الحرارة.
اتزان دوراني	Rotational Equilibrium	حالة للجسم تكون فيها محصلة عزم الدوران عليه صفرية. الجسم الذي له كمية حركة زاوية ثابتة يكون في حالة اتزان دوراني.
اتزان غير مستقر	Unstable Equilibrium	حالة اتزان لن يعود إليها الجسم إذا اضطرب. عند الاتزان، يكون الجسم غير واقع تحت تأثير أي محصلة قوة أو محصلة عزم دوراني. لكن إذا تحرك الجسم بعيدا عن حلة الاتزان تلك، فإن محصلة القوة أو العزم الدوراني التي ستؤثر عليه ستميل لتسريعه بعيدا عن حالة الاتزان.
اتزان مستقر	Stable Equilibrium	حالة اتزان يعود إليها الجسم إذا اضطرب. عند الاتزان، يكون الجسم غير واقع تحت تأثير أي محصلة قوة أو محصلة عزم دوراني. لكن إذا تحرك الجسم بعيدا عن حالة الاتزان، فإن محصلة القوة أو العزم الدوراني التي ستؤثر عليه ستميل لإعادته للاتزان.
أثر	Wake	طريق يُترك خلف جسم أثناء تحرّكه خلال مائع.
الأثر الكهروضوئي	Photoelectric Effect	عملية تمتص فيها الذرة فوتونا للقيام بانتقال إشعاعي يقوم بقذف أحد الإلكترونات خارج الذرة.
الاحتكاك	**Friction**	القوة التي تقاوم الحركة النسبية بين سطحين متلامسين. تُبذل قوى الاحتكاك بشكل متوازٍ للأسطح في الاتجاهات التي تعاكس حركتهما النسبية.
الاحتكاك الالتصاقي	**Traction**	أكبر قوة احتكاك يمكن أن يحصل عليها جسم في وضعه الحالي.
الاحتكاك الانزلاقي	**Sliding Friction**	القوى التي تُعارض الحركة النسبية بينما ينزلق سطحان متلامسان عبر بعضهما البعض.
الاحتكاك الساكن	**Static Friction**	القوى التي تقاوم الحركة النسبية بينما تحاول قوى خارجية أن تجعل سطحين متلامسين يبدأن بالانزلق عبر بعضهما البعض.
الإحساس بالتسارع	**Feeling Of Acceleration**	يواجه الإنسان الذي يخضع لتسارع بشعور شبيه بالثقل في اتجاه معاكس لاتجاه التسارع. يتناسب مقدار هذا الإحساس بالتسارع بمقدار التسارع.
ارتفاع فولطي	Voltage Rise	مقدار الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي يستقبلها كل كولوم من الشحنة الموجبة أثناء مروره في جهاز. وهو يساوي فولطية الشحنات المغادرة للجهاز مطروحا منها فولطية الشحنات الداخلة إلى الجهاز.
تغذية راجعة	Feedback	عملية استخدام معلومات عن وضع نظام حالي للتحكّم في التغيرات التي تقوم بها في ذلك النظام.
إزالة المغنطيسية	Demagnetization	اختفاء الاستقطاب المغنطيسي في مادة.
الاستضاءة	Luminescence	انبعاث الضوء من أي طريقة عدا الإشعاع الحراري.

استطارة رايلي	Rayleigh Scattering	إعادة توجيه مسار الضوء عن طريق تفاعله مع جسيمات صغيرة من المادة.
استطارة كومبتون	Compton Scattering	عملية ارتداد فوتون من على جسم مشحون، في الغالب إلكترون. يتبادل الفوتون والجسم المشحون طاقاتهما وكمية حركتهما أثناء التصادم.
استطارة مرنة	Elastic Scattering	عملية يرتد فيها جسمان من على بعضهما البعض دون أن يفقدا أياً من طاقاتهما الحركية.
الاستقرار الحركي	Dynamic Stability	استقرار جسم أثناء حركته.
الاستقرار الساكن	Static Stability	استقرار الجسم عندما لا يكون في حالة حركة.
الاستقطاب الأفقي	Horizontal Polarization	موجة كهرومغنطيسية يشير فيها المجال الكهربائي دائما نحو اليسار أو اليمين (أفقيا). يشير المجال المغنطيسي دائما رأسيا.
الاستقطاب الدائري	Circularly Polarized	موجة ضوئية تدور فيها المجالات الكهربائية والمغنطيسية حول متجه سير تلك الموجة.
الاستقطاب الكهربائي	Electric Polarization	توزيع غير منتظم للشحنة الكهربائية بحيث يكون للجسم منطقة موجبة الشحنة ومنطقة سالبة الشحنة.
الاستقطاب المغنطيسي	Magnetic Polarization	توزيع غير منتظم للأقطاب المغنطيسية بحيث يكون للجسم منطقة شمالية القطب ومنطقة جنوبية القطب.
استقطاب رأسي	Vertical Polarization	موجة كهرومغنطيسية يشير فيها المجال الكهربائي دائما نحو الأعلى أو الأسفل (رأسيا). يشير المجال المغنطيسي دائما أفقيا.
الإشارة	Signal	تمثيل كهربائي أو ضوئي للمعلومات.
الإشعاع	Radiation	انتقال الحرارة من خلال مرور الإشعاع الكهرومغنطيسي بين الأجسام.
أشعة إكس	X-Rays	فوتونات من الإشعاع الكهرومغنطيسي ذات طاقة عالية.
أشعة جاما	Gamma Rays	فوتونات من الإشعاع الكهرومغنطيسي ذات طاقة عالية جدا، تنتج في الغالب أثناء الاضمحلال لإشعاعي.
اضطراب	Turbulence	دوامات وتيارات دائرية لا يمكن التنبؤ بها في تدفق مائع اضطرابي.
الاضمحلال الإشعاعي	Radioactive Decay	الاضمحلال التلقائي لنواة والذي يحيلها إلى أجزاء.
اضمحلال ألفا	Alpha Decay	اضمحلال إشعاعي يتم فيه هروب نواة هيليوم (بروتونان ونيوترونان) من نواة أكبر غنية بالبروتونات عن طريق النفقية الكمية.
اضمحلال بيتا	Beta Decay	اضمحلال إشعاعي تسمح فيه القوة نووية الضعيفة للنيوترون في نواة غنية بالنيوترونات بأن يتفكك إلى إلكترون، وبروتون، ونيوترينو مضاد. يظل البروتون في النواة، لكن الإلكترون والنيوترينو المضاد يخرجان.
الإطار المرجعي القصوري	Inertial Frame Of Reference	إطار مرجعي غير متسارع وبالتالي هو إما ساكن أو يتحرك بسرعة ثابتة. تصف قوانين الحركة أي وضع بدقة إذا كان مُشاهدا من إطار مرجعي قصوري.
الأقطاب	Poles	أجسام تحمل قطباً مغنطيسياً.
الأقطاب المغنطيسية	Magnetic Poles	أجسام تحمل قطباً مغنطيسياً.
الإلكترون فولت	Electron Volt (Ev)	وحدة طاقة تساوي الطاقة التي تتحصل عليها شحنة أولية (إلكترون أو بروتون) بينما تسير خلال فرق فولطية مقداره 1.0V. الإلكترون فولت الواحد يساوي تقريبا 1.602×10^{-19}J.
الإلكترونات	Electrons	شحنات سالبة صغيرة جدا تكوّن الأجزاء الخارجية للذرة، وهي الحاملات الأساسية للكهرباء والحرارة في المعادن.
الألوان الأولية الصبغية	Primary Colors Of Pigment	ألوان الأصباغ الثلاثة (سماوي، وأرجواني وأصفر) والتي تمتص الألوان الأولية الثلاثة للضوء (الأحمر، والأخضر، والأزرق، على التوالي). يمكن وضع مزيج من هذه الأصباغ الثلاثة على سطح أبيض لجعلها تعكس أي مزيج ممكن من الألوان الأولية للضوء وبالتالي تجعل أعيننا تدرك الألوان المختلفة.
الألوان الأولية للضوء	Primary Colors Of Light	ألوان الضوء الثلاثة (أحمر، وأخضر، وأزرق) التي تستشعرها الثلاث خلايا المخروطية الحسّاسة للون في أعيننا. مزج هذه الألوان الثلاثة بدرجات متفاوتة يمكن أن تجعل

		عينيك تدرك أي لون.
أمبير (A)	Ampere (A)	وحدة التيار الكهربائي في النظام العالمي Si (مرادف لـ كولوم – لكل – ثانية). يُعرّف الأمبير الواحد على أنه مرور 6.25×10^{18} جسيم مشحون في كل ثانية وهو تقريبا التيار المتدفق خلال مصباح ضوئي ذي 100W يعمل بالقدرة الكهربائية المنزلية ذات فرق الجهد 110V.
أمبير- متر (A·M)	Ampere·Meter (A·M)	وحدة القطب المغنطيسي في وحدة النظام العالمي Si.
الانبعاث التلقائي للإشعاع	Spontaneous Emission Of Radiation	انبعاث الضوء الذي يحدث عندما تحرّر ذرة مثارة، أو نظام شبيه بالذرة، طاقة مختزنة بشكل تلقائي خلال الانتقال الإشعاعي. الفوتون الناتج يكون مستقل وفريد.
الانبعاث المستحث للإشعاع	Stimulated Emission Of Radiation	انبعاث ضوء يحدث عندما تُحرّر ذرة مثارة، أو نظام مثار شبيه بالذرة، طاقة مختزنة من خلال انتقال إشعاعي عن طريق إخراج نسخة مطابقة من فوتون مار خلال ذلك النظام.
الانبعاثية	Emissivity	مقدرة سطح على بعث أو امتصاص إشعاع حراري، بالنسبة لبعث أو امتصاص جسم أسود تماما عند نفس درجة الحرارة.
إنتاج زوج إلكترون – بوزيترون	Electron-Positron Pair Production	تكوّن إلكترون وبوزيترون أثناء تصادم ذي طاقة عالية.
الانتروبي	Entropy	الكمية الفيزيائية التي تقيس مقدار الاضطراب في نظام. يكون مقدار الانتروبي لنظام صفرا عند الصفر المطلق.
الانتقال الإشعاعي	Radiative Transition	انتقال ذرة أو نظام شبيه بالذرة من مستوى إلى آخر من خلال بعث أو امتصاص موجة كهرومغنطيسية.
انتقال الطاقة الرنيني	Resonant Energy Transfer	انتقال الطاقة التدريجي من وإلى حالة رنين طبيعي أحدثته قوى صغيرة متزامنة مع جزء معيّن من كل دورة تذبذبية.
الانـحباس الإشعاعي	Radiation Trapping	ظاهرة يواجه فيها طول موجي معيّن من الضوء صعوبة في المرور خلال مادة تتلهّف على امتصاصه أو بعثه. يمر الضوء من ذرة، أو نظام شبيه بالذرة، إلى أخرى ولكن لا يتقدم نـحو الأمام كثيرا.
الاندماج النووي	Nuclear Fusion	اندماج نواتين صغيرتين لتكوين نواة أكبر. أثناء الاندماج، تربط القوة النووية النيوكلونات سوية مع بعضها وتحرّر طاقة.
انسيابي	Streamlined	سطح مستدق بعناية بحيث لا يتعطل المائع المتدفق حوله ولا يواجه فصلاً في التدفق عند المقاومة الضغطية.
الانشطار المستحثّ	Induced Fission	حدث انشطاري بسبب تصادم، عادة مع نيوترون.
الانشطار النووي	Nuclear Fission	تحطّم نواة ثقيلة إلى أجزاء أصغر. أثناء الانشطار، تتنافر الأجزاء المشحونة بشحنة موجبة عن بعضها البعض وتحرّر طاقة.
الانعكاس	Reflection	إعادة توجيه جميع أو جزء من موجة عندما تنعكس من على طبقة حديّة بين وسطين.
الانعكاس الكلي الداخلي	Total Internal Reflection	انعكاس كامل لموجة ضوئية يحدث عندما تخفق تلك الموجة من مغادرة وسط له معامل انكسار كبير إلى وسط معامل انكساره صغير عند زاويا ضحلة جدا.
انقلاب تعدادي	Population Inversion	تعداد غير متزن لأنظمة كمية يكون عددها في المستويات التي لها طاقة أعلى أكبر من عددها في مستويات الطاقة الأدنى.
الانكسار	Refraction	انعطاف مسار موجة يحدث عندما تعبر الموجة طبقة حديّة بين وسطين وتواجه تغيّراً في السرعة.
أنماط اهتزازية عليا	Higher-Order Vibrational Mode	نمط اهتزازي أكثر تعقيدا من النمط الأساسي تتحرك فيه الأجزاء المختلفة للنظام الممتد في اتجاهات متعاكسة.
الاهتزاز	Vibration	حركة تلقائية متكررة ومتناغمة حول موقع اتزان.
اهتزاز متجانس	Sympathetic Vibration	انتقال الطاقة بين رنينين طبيعيين لهما تردد تذبذبي مشترك.

أوم (Ω)	Ohm (Ω)	وحدة المقاومة الكهربائية في النظام العالمي للوحدات Si. المقاومة التي مقدارها 1 أوم تُعطي هبوطاً فولطياً مقداره 1 فولت عندما يتدفق خلالها تيار مقداره 1 أمبير.
أومي	Ohmic	جسم يُعطي هبوطا فولطيا يتناسب مع التيار وفقا لقانون أوم.
أيون	Ion	ذرة أو جزيء بمحصلة شحنة كهربائية.
باسكال (Pa)	Pascal (Pa)	وحدة الضغط في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لنيوتن – لكل – متر^2). الضغط الجوّي عند سطح البحر هو 100,000 باسكال تقريبا. قطرة ماء ذات ارتفاع 1 ملليمتر تبذل ضغطاً مقداره 10 باسكال على يدك.
البايت	Byte	ثمانية بت ثنائية والتي مجتمعة يمكنها أن تمثل عدداً بين 0 و255. كثيراً ما يُستخدم البايت لتمثيل الأحرف ورموز أخرى، بحيث يوجد اصطلاح يربط كل رمز بعدد معيّن.
البت	Bit	قيمة ثنائية وحيدة، إما 0 أو 1.
البروتونات	Protons	جسيمات دون ذرية مشحونة بشحنة موجبة وموجودة في أنوية الذرات.
بطن الاهتزاز	Vibrational Antinode	منطقة في الجسم المهتز تواجه أقصى إزاحة.
البُعد	Distance	المسافة بين موقعين في الفراغ. وحدة المسافة في النظام العالمي Si هي المتر.
بُعد الصورة	Image Distance	المسافة بين العدسة والصورة التي تكوّنها العدسة. تتكوّن الصور الحقيقية عند أبعاد صور موجبة بينما تتكوّن الصور الخيالية عند أبعاد صور سالبة.
البُعد البؤري	Focal Length	مسافة تقع خلف العدسة المجمّعة والتي تتكون عندها الصورة الحقيقة لجسم بعيد. البُعد البؤري لعدسة مفرّقة سالب وهو مسافة تقع أمام العدسة والتي تتكون عندها الصورة الخيالية لجسم بعيد.
بُعد الجسم	Object Distance	المسافة بين الجسم والعدسة التي تكوّن صورته.
بلازما	Plasma	طور من أطوار المادة شبيه بالغاز يحتوي على جسيمات مشحونة كهربائيا، مثل الأيونات والإلكترونات. تتميز البلازما عن الغاز بالتفاعلات الكهرومغنطيسية القويّة بين جسيماته.
بلّوري	Crystalline	مادة ذراتها مرتبة في نمط منتظم يمتد على طول المسافات الذرية وفي جميع الاتجاهات.
البوزيترون	Positron	المادة المضادة للإلكترون. البوزيترون مشحون بشحنة موجبة.
تأثير دوبلر	Doppler Effect	فرق بين التردد الذي أُرسلت به الموجة والتردد الذي تُستقبل به، يسببه الحركة النسبية بين المُرسل والمستقبل.
التبخّر	Evaporation	تحوّل في طور المادة يُصبح فيه السائل غازا.
التجمّد	Freezing	تحوّل في طور المادة يُصبح فيه السائل صلباً.
التجويف الرنيني	Resonant Cavity	دائرة رنينية بسيطة تحتوي على شريط أو غطاء موصِل ومشكل بعناية وتُكافئ مكثّفاً وملفاً حثّياً. تتدفق الطاقة ذهابا وإيابا بين المجالات الكهربائية والمغنطيسية للتجويف.
تحدّر فولطي	Voltage Gradient	انحدار تدريجي في الفولطية خلال منطقة في الفراغ. التحدّر الفولطي هو مجال كهربائي.
تحوّل الطور	Phase Transition	تحوّل طور مادة إلى طور آخر.
تحويل العناصر	Transmutation Of Elements	تغيير ذرات عنصر لذرات عنصر آخر عن طريق عمليات نووية تقوم بتغيير عدد البروتونات في أنويتها.
التداخل	Interference	ظاهرة موجية تحدث عند مرور موجات بنفس الموضع من اتجاهات مختلفة فإما أن تدعم بعضها البعض أو تعارض بعضها البعض.
التداخل البنّاء	Constructive Interference	تداخل يصل فيه موجتان أو أكثر لموقع مكاني-زماني وهما متفقتين في الطور وتنتجان تأثيراً قوّياً جدا.
التداخل الهدّام	Destructive Interference	تداخل يصل فيه موجتان أو أكثر لموقع مكاني-زماني وهما مختلفتين في الطور وتنتج تأثيراً ضعيفاً جدا.
تدرّج ضغطي	Pressure Gradient	توزيعات في الضغط تتفاوت باستمرار مع الموقع.
التدرجات الضغطية المعاكسة	Adverse Pressure Gradient	منطقة في مائع متدفق تستلزم من المائع أن يتدفق فيها نحو الضغط الأعلى. كمية

		حركة المائع وطاقته الحركية تعينه في هذه الحالة، على الرغم من أنه يتباطأ.
تدفق اضطرابي	Turbulent Flow	تدفق غير منتظم ومتذبذب ولا يمكن التنبؤ به لمائع بحيث تتباعد مناطق المائع المتجاورة عن بعضها بسرعة.
تدفق حالة الاستقرار	Steady-State Flow	حالة في المائع لا تتغيّر فيها خصائصه بالنسبة للزمن عند أي نقطة ثابتة في الفراغ.
تدفق طبقي	Laminar Flow	تدفق سلس يمكن التنبؤ به لحركة مائع. تظل المناطق المتجاورة في هذا المائع متجاورة دائما أثناء حركتها.
التذبذب	Oscillation	حركة أو عملية تكرارية وتناغمية تحدث في الغالب حول حالة اتزان.
التراكب	Superposition	تراكب موجتين أو أكثر بحيث تتجمّع سعاتها وتكوّنا موجة واحدة جامعة.
الترانزستور	Transistor	مكوّن إلكتروني يسمح لمقدار صغير جدا من الشحنة الكهربائية، سواء متحركة أو ساكنة، بالتحكّم في تدفق تيار كهربائي كبير.
التردد	Frequency	عدد الدورات الكاملة التي يقوم بها نظام تذبذبي في مقدار معيّن من الزمن. وحدة التردد في النظام العالمي Si هي الهرتز.
الترسيب	Deposition	تحوّل في طور المادة يُصبح به الغاز صلباً.
ترنّح	Precession	تغيّر في اتجاه محور دوران جسم ملتف يحدث عندما يتعرّض لعزم دوراني خارجي.
التسارع	Acceleration	كمية متجهة تقيس مقدار سرعة تغيّر سرعة جسم: كلما زاد التسارع، زاد تغيّر سرعة الجسم كل ثانية. يحتوي التسارع على كل من مقدار التسارع والاتجاه الذي يتسارع الجسم فيه. هذا الاتجاه هو مماثل لاتجاه القوة المسببة لهذا التسارع. وحدة التسارع في النظام العالمي Si هي المتر – لكل – ثانية^2.
التسارع الزاوي	Angular Acceleration	كمية متجهة تقيس سرعة تغيّر السرعة الزاوية لجسم: كلما زاد التسارع الزاوي، زاد تغيّر السرعة الزاوية لجسم في كل ثانية. يحتوي التسارع الزاوي على كل من مقدار التسارع الزاوي والاتجاه الذي يحدث حوله التسارع الزاوي. هذا الاتجاه هو مطابق لاتجاه العزم الدوراني المسبب للتسارع الزاوي. وحدة التسارع الزاوي في وحدة النظام العالمي Si هي الراديان – لكل – ثانية^2.
التسارع المركزي	Centripetal Acceleration	تسارع يشير دائما لمركز مسار دائري.
التسارع بسبب الجاذبية	Acceleration Due To Gravity	ثابت فيزيائي يحدد سرعة تسارع جسم يسقط سقوطا حرّا وأيضا يربط بين وزن الجسم وكتلته. عند سطح الأرض، التسارع بسبب الجاذبية هو $9.8M/S^2$ (9.8N/Kg).
التسامي	Sublimation	عملية تتحوّل فيها الذرات أو الجزيئات من صلب إلى غاز مباشرة.
تسلا (T)	Tesla (T)	وحدة المجال المغنطيسي في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لنيوتن-لكل-أمبير. متر).
التشتت	Dispersion	اعتماد سرعة الضوء خلال مادة على تردد ذلك الضوء.
التصادم غير المرن	Inelastic Collision	تصادم يكون فيه بعض الطاقة الحركية الموجودة قبل التصادم غير موجودة كطاقة حركية بعد التصادم.
تصادم مرن	Elastic Collision	تصادم تكون فيه جميع الطاقة الحركية قبل التصادم موجودة أيضا كطاقة حركية بعد التصادم.
تعديل التردد	Frequency Modulation	تقنية لتمثيل الصوت أو المعلومات عن طريق تغيير تردد الموجة.
تعديل السعة	Amplitude Modulation	تقنية لتمثيل الصوت أو المعلومات عن طريق تغيير سعة (شدة) الموجة.
تعطّل	Stall	عندما يتوقف مائع عن التدفق ويُفسد حالة التدفق المستقر. في التدفق الديناميكي الهوائي حول سطح انسيابي، يشير التعطّل لانفصال تدفق الهواء الذي يُحدثه تأخر في تدفق الهواء القريب من السطح الانسيابي.
التغيرات الحركية	Dynamic Variation	التغيرات في كمية فيزيائية مثل الضغط والتي تسببها الحركة.
تغيّرات ساكنة	Static Variations	تغيرات في كمية فيزيائية مثل الضغط والتي لا تحدث بسبب الحركة.
التفاعل التسلسلي	Chain Reaction	عملية يثير فيها الحدث حدثاً واحداً آخراً فأكثر يكون مشابهاً للحدث الأصلي بحيث تصبح العملية مستمرة ذاتيا.
التفاعل التسلسلي الانفجاري	Explosive Chain Reaction	تفاعل تسلسلي يحُثّ فيه كل انشطار انشطاراً واحد لاحقا فأكثر فيرتفع معدل الانشطار عاليا.

التفاعل الكيميائي	Chemical Reaction	صدام بين ذرتين أو جزيئين فأكثر والتي تتسبب في إعادة ترتيب الذرات لتكوين ذرات وجزيئات مختلفة.
التفريغ	Discharge	تدفق تيار كهربائي خلال غاز.
التفريغ الهالي	Corona Discharge	تفريغ خافت التوهّج يحيط بجسم صغير ذي شحنة عالية في ظل وجود غاز. في التفريغ، تنتقل الشحنة الكهربائية من الجسم إلى جزيئات الغاز.
التكثّف	Condensation	تحوّل في طور المادة يصبح فيه الغاز سائلا.
التمثيل التناظري	Analog Representation	تمثيل مباشر للأرقام كقيم مستمرة تعبر عن كميات فيزيائية مثل الفولطية، أو الشحنة، أو الضغط.
التمثيل الرقمي	Digital Representation	تمثيل الأعداد عن طريق تفكيكها إلى خانات وبعد ذلك تُمثّل كل خانة بشكل فردي بمقادير محددة لتعطي الكميات فيزيائية مثل الفولطية أو الشحنة أو الضغط.
التمغنط	Magnetization	تكوين استقطاب مغنطيسي في مادة.
التنوّي	Nucleation	تكوين بذر ابتدائي لأحد أطوار المادة في وسط طور آخر للمادة.
التوازي (توصيل الأسلاك)	Parallel	توصيل ينقسم فيه التيار الواصل لجهازين كهربائيين أو أكثر إلى أجزاء منفصلة لكي يتدفق خلال الأجهزة ويجتمع بعد مغادرته لها. يواجه التيار نفس التغيّر في الفولطية في كل جهاز.
التوافقيات	Harmonic	مضاعفات صحيحة من التردد الأساسي لنظام متذبذب. التوافق الثاني هو ضعف التردد الأساسي، والثالث هو ثلاثة أضعاف التردد الأساسي. من حيث المبدأ، قد تستمر التوافقيات إلى ما لا نهاية.
التوالي (توصيل الأسلاك)	Series	توصيل يتدفق فيه التيار الواصل لجهازين كهربائيين أو أكثر بشكل تتابعي أي من جهاز تلو جهاز قبل أن يغادرها. قد يواجه التيار تغيّرات مختلفة في الفولطية في الأجهزة المختلفة.
التوتر	Tension	قوى خارجية على جسم تميل إلى تمديده.
التوصيل	Conduction	انتقال الحرارة خلال مادة عن طريق نقل الطاقة من ذرة أو جزيء إلى آخر. لا تتحرك الذرات ذاتها مع الحرارة. في المعادن، تساهم الإلكترونات المتحرّكة أيضا في نقل الحرارة.
التوصيل الأمامي	Forward Biased	وصلة م – س ترتفع فيها فولطية شبه الموصّل نوع – م بالنسبة للفولطية على شبه الموصّل نوع – س.
توصيل عكسي	Reverse Biased	وصلة م-س يُخفَض فيها فولطية شبه الموصّل نوع-م بالنسبة لفولطية شبه الموصّل نوع-س.
التوهج الحراري	Incandescence	انبعاث إشعاع حراري من جسم ساخن.
التيار	Current	مقدار الشحنة الكهربائية المتدفقة عبر نقطة أو خلال سطح لكل وحدة زمن. وحدة التيار في النظام العالمي Si هي الأمبير.
تيار الحمل	Convection Current	تدفق مائع مندفع بواسطة الحمل.
التيار الكهربائي	Electric Current	حركة أو تدفق الشحنة الكهربائية.
التيار المتردد	Alternating Current	تيار كهربائي يعكس اتجاه تدفقه بشكل دوري. اختصارا Ac.
التيار المستمر	Direct Current	تيار كهربائي يتدفق دائما في اتجاه واحد. اختصارا Dc.
ثابت الجاذبية	Gravitational Constant	ثابت أساسي في الطبيعة يُحدّد قوى الجذب التي يبذلها جسمان على بعضهما البعض. قيمة الثابت هي $6.6720\ N{\cdot}M^2/Kg^2 \times 10^{-11}$.
ثابت الزنبرك	Spring Constant	مقياس لصلابة جسم مرن، ويربط ثابت الزنبرك بين تشوّه الجسم وقوة الإرجاع التي يبذلها. كلما كبُر ثابت الزنبرك، أصبح أكثر صلابة.
ثابت بلانك	Planck Constant	الثابت الأساسي في الفيزياء الكميّة، يساوي طاقة الجسم مقسوما على تردد موجته الكميّة. مقداره حوالي $6.626 \times 10^{-34} J{\cdot}S$.
ثابت بولتزمان	Boltzmann Constant	ثابت التناسب الذي يربط بين ضغط الغاز وكثافة جسيماته ودرجة حرارته. له مقدار مُقاس قيمته $1.381 \times 10^{-23}\ Pa{\cdot}M^3/(Particle{\cdot}K)$

ثابت ستيفان - بولتزمان	Stefan-Boltzmann Constant	ثابت التناسب الذي يربط القدرة المنبعثة من سطح بانبعاثيته، ودرجة حرارته، ومساحة سطحه. له مقدار مُقاس يساوي 5.67×10^{-8} $J/(S \cdot M^2 \cdot K^4)$
ثابت كولوم	Coulomb Constant	الثابت الأساسي في الطبيعة والذي يُحدّد القوى الكهروستاتيكية التي تبذلها شحنتان على بعضهما البعض. مقداره المُقاس هو 8.988×10^9 $N \cdot M^2/C^2$.
ثانية (S أو Sec)	Second (S Or Sec)	وحدة الزمن في النظام العالمي للوحدات Si. (تُعرَّف الثانية الواحدة اصطلاحا بأنها الفترة الزمنية لـ 9,192,631,770 دورة للإشعاع الذي يُقابل الانتقال بين مستويين ثانويين في الحالة الأرضية لذرة السيزيوم الـ 133.)
الثقب الأسود	Black Hole	منطقة في الفراغ، كروية في العادة، يكون فيها تشوه جاذبيته المكاني والزماني شديداً جدا بحيث حتى الضوء لا يمكنه الهروب.
ثنائي القطب المغنطيسي	Magnetic Dipole	زوج من الأقطاب متساوية ومتعاكسة تفصل بينهما مسافة.
ثنائية الموجة-الجسيم	Wave-Particle Duality	ملاحظة أن كل شيء في الطبيعة له خصائص جسيمية وموجية. يكون الشيء شبيهاً بالجسيم عندما ينبعث أو يُمتص أو يُشاهد وشبيهاً بالموجة عندما يسير خلال الزمان والمكان.
الجاذبية	Gravity	جذب كتلة الأرض، أو القمر، أو كوكب لأجسام عند أسطحها أو قريبة نسبيا منها. تبذل جميع الأجسام قوى جذب على جميع الأجسام الأخرى.
جدار نطاقي	Domain Wall	سطح حدّي بين نطاقات مغنطيسية لها اتجاهات مغنطيسية مختلفة.
الجرْس الموسيقي	Timbre	مزيج من النغمات في صوت آلة موسيقية والتي هي خاصة بتلك الآلة.
جزيء	Molecule	جسيم يتكوّن من ذرتين أو أكثر. الجزيء هو الجزء الأصغر من المركب الكيميائي الذي يُحافظ على الخصائص الكيميائية لذلك المركب.
جسيمات دون ذرية	Subatomic Particles	مكوّنات البناء الأساسية للكون، والتي تكوّن الذرات والمادة.
جسيمات فيرمي	Fermi Particle	صنف من الجسيمات الأساسية يشتمل على إلكترونات وبروتونات ونيوترونات ويحقق مبدأ باولي للاستبعاد.
جول - لكل - ثانية (J/S)	Joule-Per-Second (J/S)	وحدة القدرة في النظام العالمي Si (مرادف للواط Watt).
جول - لكل كيلوغرام·كالفن (J/Kg·K)	Joule-Per-Kilogram-Kelvin (J/Kg·K)	وحدة الحرارة النوعية في النظام العالمي Si.
جول (J)	Joule (J)	وحدة الطاقة والشغل في النظام العالمي Si (مرادف لنيوتن · متر). يتطلّب رفع ١لتر من الماء بمقدار 10 سنتيمترات للأعلى بالقرب من سطح الأرض شغلاً مقداره ١ جول.
حالة	State	ترتيب ممكن للإلكترونات (أو أي جسيمات) في نظام كميّ.
الحالة الأرضية	Ground State	ترتيب له أدنى طاقة في نظام؛ تترتّب إلكتروناته (أو جسيمات أخرى) في موجات كميّة (أي مدارات أو مستويات) لها أدنى طاقة ممكنة.
الحالة المثارة	Excited State	ترتيب له طاقة إضافية في نظام؛ تترتّب إلكتروناته (أو جسيمات أخرى) في موجات كميّة (مثلا، مدارات أو مستويات) لها طاقة أكبر من أقل طاقة ممكنة.
الحثّ المغنطيسي	Magnetic Induction	عملية يُنشئ فيها المجال المغنطيسي المتغيّر بالنسبة للزمن تيارا كهربائيا أو يؤثر عليه.
الحجم	Volume	امتداد منطقة ثلاثية الأبعاد في الفراغ مُحاطة بسياج معيّن. وحدة الحجم في النظام العالمي للوحدات Si هي متر1.3
حدّ المرونة	Elastic Limit	أقصى تشوّه في جسم يمكن أن يعود بعده إلى حجمه الأصلي دون أن يحدث له تشوّه دائم.
الحرارة	Heat	الطاقة التي تتدفق من جسم لآخر نتيجة اختلاف درجات الحرارة بين الجسمين.
الحرارة الكامنة للانصهار	Latent Heat Of Fusion	الحرارة الكامنة للذوبان.
الحرارة الكامنة للتبخّر	Latent Heat Of Evaporation	الحرارة المطلوبة لتحويل وحدة كتلة من مادة ما من سائل إلى غاز دون تغيير درجة حرارتها.
الحرارة الكامنة للتبخير	Latent Heat Of Vaporization	الحرارة الكامنة للتبخّر.
الحرارة الكامنة للذوبان	Latent Heat Of Melting	الحرارة المطلوبة لتحويل وحدة كتلة من مادة ما من جامد إلى سائل دون تغيير درجة حرارتها.
الحرارة النوعية	Specific Heat	مقدار الحرارة التي يجب إضافتها لوحدة كتلة من مادة ما لكي تُحدث ارتفاع وحدة واحدة في درجة حرارتها. وحدة الحرارة النوعية في النظام العالمي للوحدات Si هي

		الجول – لكل – كيلوغرام ٠ كالفن.
الحركة الانتقالية	Translational Motion	حركة يتحرك فيها جسم بأكمله على طول خط مستقيم أو منحنٍ.
الحركة التوافقية البسيطة	Simple Harmonic Motion	الحركة المنتظمة والمتكررة لمتذبذب توافقي. لا يعتمد الزمن الدوري لحركة توافقية بسيطة على سعة التذبذب.
الحركة الدورانية	Rotational Motion	حركة دوران جسم حول محور. فقط اتجاه الجسم الخاضع لحركة دورانية سيتغيّر، لكن موقعه سيظل بلا تغيّر.
حركة السيكلوترون	Cyclotron Motion	الحركة الدائرية أو الحلزونية لجسم مشحون في مجال مغنطيسي. يميل الجسم المشحون للدوران حول خطوط التدفق المغنطيسي.
الحركة النسبية	Relative Motion	حركة جسم من منظور جسم آخر. الجسمان المتحركان بالنسبة لبعضهما البعض لهما سرعات مختلفة.
حركة حرارية	Thermal Motion	الحركات العشوائية للجسيمات المنفردة في مادة بسبب الطاقة الداخلية أو الحرارية لتلك المادة.
حركة دائرية منتظمة	Uniform Circular Motion	حركة بسرعة ثابتة حول مسار دائري. يتسارع الجسم الخاضع لحركة دائرية منتظمة نـحو مركز الدائرة.
الحمل	Convection	انتقال الحرارة عن طريق حركة مائع. في العادة، يتبع الحمل الدوران الطبيعي للمائع والذي يصاحب الفروق في درجات الحرارة والكثافة.
الحيود	Diffraction	ظاهرة موجية تحُدّ من القدرة على تركيز الضوء وتغيّر من طريقة سيره بعد المرور خلال فتحة.
خط الانسياب	Streamline	المسار الذي يتبعه جزء معيّن من مائع متدفق.
خطوط الفيض المغنطيسي	Magnetic Flux Lines	خطوط مجرّدة تتبع اتجاه المجال المغنطيسي المحلّي لها كثافة تتناسب مع ذلك المجال المحلّي. خطوط المجال تبدأ عند الأقطاب الشمالية وتنتهي عند الأقطاب الجنوبية.
خلية الحمل	Convection Cell	حلقة من تدفق مائع تندفع بواسطة الحمل. في العادة، يرتفع المائع في خلية الحمل في المنطقة الأسخن ويهبط في المنطقة الأبرد.
دائرة الرنين	Tank Circuit	دائرة رنين بسيطة تحتوي على مكثّف وملف حثّ. تتدفق الطاقة ذهابا وإيابا بين هذين الجهازين بشكل متكرّر.
الدائرة الكهربائية	Electric Circuit	حلقة كاملة من موصلات، وأحمال، ومصادر طاقة والتي يمكن أن يتدفق خلالها التيار بشكل مستمر.
الدائرة المغلقة	Closed Circuit	دائرة كهربائية كاملة يمكن أن يتدفق خلالها التيار الكهربائي بشكل مستمر.
الدائرة المفتوحة	Open Circuit	دائرة غير مكتملة بحيث تمنع فجوة في الموصّلات الكهربائية التيار الكهربائي عن التدفق.
الدائرة المقصَّرة	Short Circuit	عيب في الدائرة الكهربائية يسمح للتيار بتجاوز الحمولة التي يجب أن يشغّلها.
الدايود	Diode	جهاز شبه موصّل يسمح بتدفق الشحنة خلاله في اتجاه واحد فقط. تتكوّن الدايودات في الغالب بإيصال سيليكون نوع – س بسيليكون نوع – م.
درجة الحرارة	Temperature	مقياس لمتوسط الطاقة الحركية الداخلية لكل جسيم في المادة. في الغاز، تقيس درجة الحرارة متوسط الطاقة الحركية لكل ذرة أو جزيء.
درجة الصوت	Pitch	تردد الصوت.
درجة حرارة الذوبان	Melting Temperature	درجة الحرارة التي يمكن أن يتواجد فيها الطور الجامد والسائل لمادة في الوقت نفسه في اتزان مستقر.
درجة حرارة الغليان	Boiling Temperature	درجة الحرارة الحدية والتي تبدأ عندها فقاعات الحالة الغازية بالاستقرار داخل الحالة السائلة لمادة.
درجة حرارة اللون	Color Temperature	درجة الحرارة التي يبعث عندها الجسم الأسود إشعاعاً حرارياً كهرومغنطيسياً بتوزيع معيّن من الأطوال الموجية.
دفع القوة	Impulse	الطريقة الميكانيكية لنقل كمية الحركة. جسم يُعطي دفعاً لجسم آخر ببذل قوة معيّنة على الجسم الثاني لفترة زمنية معينة. كردة فعل، يبذل الجسم الآخر دفعا مساويا للجسم الأول ولكن يعاكسه في الاتجاه.

الدفع	Thrust	قوة دافعة إلى الأمام.
دفع قوة زاوي	Angular Impulse	الوسيلة الميكانيكية لنقل كمية الحركة الزاوية. يُعطي جسم دفع قوى زاوياً لجسم آخر ببذل عزم دوراني معيّن على الجسم الآخر لفترة محددة من الزمن. بالمقابل، يُعطي الجسم الآخر دفع قوى زاوياً للجسم الأول مساوياً في المقدار ومعاكساً في الاتجاه.
دوّامة	Vortex	منطقة ملتفة من المائع تتحرك بشكل دائري حول تجويف مركزي.
دورة - لكل - ثانية (S/1)	Cycle-Per-Second (1/S)	وحدة التردد في النظام العالمي Si (مرادف لهرتز).
الديناميكا الهوائية	Aerodynamics	دراسة التفاعلات الديناميكية (الحركية) للهواء مع الأجسام.
ذراع الرافعة	Lever Arm	المسافة الموجهة من نقطة الارتكاز أو محور الدوران إلى النقطة التي تؤثر عندها القوة.
الذرة	Atom	أصغر جزء من عنصر كيميائي والذي يُحافظ على الخصائص الكيميائية لذلك العنصر.
الذوبان	Melting	تحوّل في طور المادة يُصبح فيه الصلب سائلاً.
الرابطة الكيميائية	Chemical Bond	نقص في مقدار الطاقة يُبقي ذرتين أو أكثر متصلة ببعضها ويجب تعويض هذا النقص لفصل هذه الذرات. تتكوّن الروابط الكيميائية عندما تتحرّر الطاقة الكيميائية الكامنة أثناء تكوين الجزيء.
الراديان	Radian	الوحدة الطبيعية التي تقاس بها الزوايا. يوجد 2Π راديان في الدائرة الكاملة، لذا فإن 1 راديان هو $\Pi/180$ درجة أو تقريبا 57.3^{o}.
راديان - لكل - ثانية (S/1)	Radian-Per-Second (1/S)	وحدة السرعة الزاوية أو مقدار السرعة الزاوية في النظام العالمي للوحدات Si. الجسم الذي يدور بسرعة 1 راديان - لكل - ثانية يُكمل دورة كاملة في أقل من 6.3 ثانية.
راديان - لكل - ثانية2 (S2/1)	Radian-Per-Second2 ($1/S^2$)	وحدة التسارع الزاوي في النظام العالمي للوحدات Si.
رسم تخطيطي	Schematic Diagram	صورة رمزية لمخطط تركيب جهاز إلكتروني.
الرشّ	Sputtering	خروج الذرات من سطح بسبب اصطدام أيونات أو ذرات أو مقذوفات صغيرة جدا ذات طاقة عالية جدا به.
الرطوبة النسبية	Relative Humidity	الرطوبة الحقيقية كنسبة من الرطوبة اللازمة لتحقيق اتزان في الطور بين الماء السائل والغازي.
الرنين الطبيعي	Natural Resonance	عملية ميكانيكية تتسبب فيها طاقة جسم معزول أن يقوم الجسم بحركة معيّنة مرة بعد أخرى. يتحدّد معدل حدوث هذه الحركة بالخصائص الفيزيائية للجسم.
زاوية المواجهة	Angle Of Attack	زاوية ميل السطح المناسب هوائيا بالنسبة لتدفق الهواء حوله.
زاوية بروستر	Brewster's Angle	الزاوية التي لا ينعكس عندها أي ضوء مستقطب رأسيا من سطح شفّاف موضوع أفقيا. يعتمد المقدار الدقيق لهذه الزاوية على معامل انكسار السطح.
الزمن الدوري	Period	الزمن اللازم لإكمال دورة واحدة كاملة لحركة تكرارية.
الزمن الدوري المداري	Orbital Period	الزمن المطلوب لإكمال دورة مدارية واحدة.
السائل	Liquid	شكل من أشكال المادة يتكوّن من جسيمات (ذرات أو جزيئات) تلامس بعضها البعض ولكن لديها الحرية للتحرك بالنسبة لبعضها البعض. للسائل حجم محدّد لكنه يأخذ شكل الوعاء الذي يحتويه.
السرعة	Velocity	كمية متجهة تقيس سرعة تغيّر موقع جسم: كلما زادت السرعة، زادت المسافة التي يقطعها الجسم كل ثانية. تتكوّن السرعة من كل من مقدار السرعة واتجاه سير الجسم. وحدة السرعة في النظام العالمي للوحدات Si هي المتر - لكل - ثانية.
سرعة الإفلات	Escape Velocity	السرعة التي تحتاجها مركبة فضائية للإفلات إلى الأبد من جرم سماوي معيّن بإتباع مساراً مدارياً على شكل قطع مكافئ.
السرعة الزاوية	Angular Velocity	كمية متجهة تقيس سرعة تغيّر الموقع الزاوي لجسم: كلما زادت السرعة الزاوية، زاد دوران الجسم في كل ثانية. تحتوي السرعة الزاوية على كل من مقدار السرعة الزاوية والاتجاه الذي

		يدور حوله الجسم. يشير هذا الاتجاه على طول محور الدوران وفق قاعدة اليد اليمنى. وحدة السرعة الزاوية في النظام العالمي Si هي الراديان - لكل - ثانية.
سرعة الصوت	Speed Of Sound	سرعة سير انضغاطات وتخلخلات الصوت في وسط مثل الهواء أو الماء.
سرعة الضوء	Speed Of Light	السرعة التي تسير بها الموجة الكهرومغنطيسية في الفراغ. سرعة الضوء في الفراغ هي299,792,458M/S .
سرعة العادم	Exhaust Velocity	سرعة عادم غازي بالنسبة لسرعة المحرك الصاروخي الذي خرج منه.
سرعة الموجة	Wave Velocity	مقدار سرعة واتجاه قمم موجة متحرّكة.
السرعة النهائية	Terminal Velocity	السرعة التي يواجه عندها الجسم المتحرك خلال المائع قوة مقاومة كافية لموازنة القوى الأخرى عليه وتمنعه من التسارع.
السرعة الهوائية	Airspeed	سرعة جسم بالنسبة للهواء الذي يتحرك خلاله.
سطح منساب هوائيا	Airfoil	سطح ديناميكي هوائي مصمّم هندسيا للحصول على قوى رفع ومقاومة معينة من الهواء المتدفق حوله.
السعة	Amplitude	الإزاحة القصوى للمتذبذب بعيدا عن موضع اتزانه.
السعة الحرارية	Heat Capacity	مقدار الحرارة الذي يجب أن يُضاف لجسم لرفع درجة حرارته بمقدار وحدة واحدة.
سعة المكثّف	Capacitance	مقدار الشحنة المنفصلة على ألواح مكثّف مقسوما على الفرق في الفولطية عبر تلك الألواح. وحدة سعة المكثّف في النظام العالمي Si هي الفاراد.
السلزيوس	Celsius	مقياس درجة حرارة يعرّف فيه 0°C على أنها درجة حرارة ذوبان الماء و 100°C على أنها درجة حرارة غليان الماء عند مستوى سطح البحر. الصفر المطلق هو 273.15°C- .
شبه موصّل	Semiconductor	عازل له فجوة شريطية صغيرة، بحيث يتطلب فقط مقداراً صغيراً من الطاقة لنقل إلكترون من مستوى تكافؤ مشغول إلى مستوى توصيل غير مشغول.
شبه موصّل نوع - س	N-Type Semiconductor	شبه موصّل مثل السيليكون يحتوي على ذرات شوائب مثل الفسفور، أو الزرنيخ (Arsenic)، أو الأنتيمون أو البزموت والتي تضع إلكترونات في مستوى توصيل شبه الموصّل.
شبه موصّل نوع – م	P-Type Semiconductor	شبه موصّل مثل السيليكون يحتوي على ذرات شوائب مثل البورون، أو الألومنيوم، أو الجاليوم أو الإنديوم أو تيلوريوم والتي تستبعد إلكترونات من مستويات تكافؤ شبه الموصّل.
الشحنات	Charges	أجسام، خصوصا جسيمات صغيرة، تحمل شحنة كهربائية.
الشحنات الكهربائية	Electric Charges	أجسام، خصوصا جسيمات صغيرة، تحمل شحنة كهربائية.
الشحنة الكهربائية	Electric Charge	خاصية ذاتية للمادة تُنشئ قوى كهروستاتيكية بين الجسيمات المشحونة. الشحنة الكهربائية هي كمية فيزيائية محفوظة. يمكن أن يكون لشحنة معيّنة مقدار موجب من الشحنة الكهربائية (شحنة موجبة) أو مقدار سالب (شحنة سالبة). وحدة الشحنة الكهربائية في النظام العالمي Si هي الكولوم.
الشريط	Band	مجموعة من المستويات في جامد تتضمّن موجات موقوفة متماثلة وبالتالي لها طاقات متماثلة.
شريط التكافؤ	Valence Band	مجموعة المستويات الكميّة في عازل التي تقع دون مستوى فيرمي.
شريط التوصيل	Conduction Band	مجموعة المستويات الكمية التي تقع فوق مستوى فيرمي.
شعاع إكس المميز	Characteristic X-Ray	شعاع إكس منبعث من ذرة عن طريق فلورة أشعة إكس. تُحدّد طاقة شعاع إكس المميز من التركيب المداري للذرة.
الشغل	Work	الطريقة الميكانيكية لنقل الطاقة. يُعرّف الشغل على أنه القوة المبذولة على جسم مضروبة في المسافة التي يتحركها الجسم في اتجاه تلك القوة. يمكن للقوة الكبيرة المبذولة لمسافة قصيرة أو القوة الصغيرة المبذولة لمسافة طويلة أن تؤدي نفس مقدار الشغل. وحدة الشغل في النظام العالمي للوحدات Si هي الجول.
الصفر المطلق	Absolute Zero	درجة الحرارة التي يكون عندها جميع الطاقة الحرارية مُزالة من جسم أو نظام. لأنه من المستحيل إيجاد وإزالة جميع الطاقة الحرارية من جسم، يمكن الاقتراب من الصفر المطلق ولكن لا يمكن الوصول إليه واقعيا.

الصلابة	Stiffness	مقياس سرعة زيادة قوة الإرجاع بينما يتشوّه النظام الباذل لتلك القوة.
صلب	Firm	له ثابت زنبرك كبير وبالتالي يواجه قوى إرجاع كبيرة استجابة للتشوهات الصغيرة.
صلب	Solid	شكل من أشكال المادة يحتوي على جسيمات (ذرات أو جزيئات) تتلامس ولكن ليس لها حرية في الحركة بالنسبة لبعضها البعض. للصلب حجم وشكل ثابت.
صوت	Sound	يحتوي الصوت في الهواء على موجات كثافة، أي أنماط من التضاغطات والتخلخلات التي تسير للخارج بعيدا عن مصدرها بسرعة الصوت.
صورة حقيقية	Real Image	نمط ضوئي، ساقط في الفراغ، يعيد تماما إنتاج النمط الضوئي الذي على سطح الجسم الأصلي. تتكوّن الصورة الحقيقية بعد العدسة التي كونتها ويمكن إسقاطها على سطح.
صورة خيالية	Virtual Image	نمط ضوئي يظهر وكأنه يأتي من منطقة معيّنة في الفراغ ويعيد إنتاج النمط الضوئي الذي على سطح الجسم الأصلي. تتكوّن الصورة الخيالية قبل العدسة التي تكوّنها ولا يمكن إسقاطها على سطح.
ضغط	Pressure	المقدار المتوسط للقوة التي يبذلها مائع على منطقة معينة في مساحة سطحية. يُعرّف الضغط على أنه مقدار القوة مقسوما على مساحة السطح التي تُبذل عليها تلك القوة. وحدة الضغط في النظام العالمي للوحدات Si هي الباسكال.
الضغط الجوّي	Atmospheric Pressure	ضغط الهواء في الغلاف الجوّي. يصل الضغط الجوّي لأقصى قيمة عند حوالي 100,000Pa بالقرب من مستوى سطح البحر ويتناقص مع زيادة الارتفاع.
الضوء	Light	انظر تحت الضوء المرئي، والضوء تحت الأحمر والضوء فوق البنفسجي.
الضوء المترابط	Coherent Light	ضوء يحتوي على فوتونات متطابقة والتي تكوّن سوية موجة كهرومغنطيسية واحدة.
الضوء تحت الأحمر	Infrared Light	ضوء غير مرئي له أطوال موجية أطول من حوالي 750 نانومتر.
ضوء غير مترابط	Incoherent Light	ضوء يتكوّن من فوتونات فردية، لكل منها موجته الكهرومغنطيسية المستقلة.
ضوء فوق بنفسجي	Ultraviolet Light	ضوء غير مرئي له أطوال موجية أقصر من حوالي 400 نانومتر.
ضوء مرئي	Visible Light	ضوء له أطوال موجية بين تقريباً 400 نانومتر (بنفسجي) و750 نانومتر (أحمر). هذا الجزء الصغير من الطيف الكهرومغنطيسي هو كل ما نستطيع إدراكه بأعيننا.
الطاقة	Energy	المقدرة على القيام بشغل. كل جسم له مقدار محدّد من الطاقة، والذي يُحدّد تماما مقدار الشغل الذي يمكن أن يؤديه ذلك الجسم في الحالة المثالية. وحدة الطاقة في النظام العالمي هي الجول.
طاقة الارتداد	Rebound Energy	مقدار الطاقة الحركية العائدة لجسمين حينما يدفع أحدهما الآخر بعيدا بعد تصادم.
طاقة التصادم	Collision Energy	مقدار الطاقة الحركية المُزالة من جسمين عند اصطدامهما.
طاقة التنشيط	Activation Energy	الطاقة اللازمة لبدء تفاعل كيميائي. تعمل هذه الطاقة على كسر أو إضعاف الروابط في المواد الكيميائية الداخلة في التفاعل لكي يستمر التفاعل في تكوين نواتج التفاعل.
طاقة الجذب الكامنة	Gravitational	طاقة كامنة مختزنة في قوى الجذب بين الأجسام.
الطاقة الحرارية	Thermal Energy Potential Energy	شكل غير منتظم من أشكال الطاقة محتوى في الطاقات الحركية والكامنة للذرات والجزيئات المنفردة والتي تكوّن المواد. بسبب توزيعها العشوائي، لا يمكن تحويل هذه الطاقة غير المنتظمة لشغل مفيد باشرة. من الأسماء الأخرى للطاقة الحرارية، الطاقة الداخلية والحرارة.
الطاقة الحركية	Kinetic Energy	شكل الطاقة المحتواة في الحركة الانتقالية والدورانية للجسم.
الطاقة الحركية الداخلية	Internal Kinetic Energy	جزء من الطاقة الحركية لجسم والذي يتضمّن فقط الحركة النسبية للجسيمات داخل الجسم والذي يستبعد الانتقال أو الدوران الإجمالي للجسم.
طاقة الضغط الكامنة	Pressure Potential Energy	حاصل ضرب حجم المائع بضغطه. لكن هذه الطاقة ليست في الحقيقة مختزنة في المائع ولكنها طاقة توفرها مضخة (أو مصدر آخر) عند توصيل المائع.
الطاقة الكامنة	Potential Energy	الشكل المختزن من الطاقة والذي يمكن أن يُنتج حركة. تُختزن الطاقة الكامنة في القوى التي بين أو داخل الأجسام.
الطاقة الكامنة الداخلية	Internal Potential Energy	هو جزء من الطاقة الكامنة لجسم والذي يتضمّن فقط القوى بين الجسيمات داخل الجسم

		مستبعدا منها تفاعل الجسم مع بيئته المحيطة.
الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة	Electrostatic Potential Energy	الطاقة المختزنة في القوى بين الشحنات الكهربائية.
الطاقة الكيميائية الكامنة	Chemical Potential Energy	طاقة مختزنة في القوى الكيميائية بين الذرات. هذه القوى الكيميائية هي كهرومغناطيسية في الأصل.
الطاقة المنتظمة	Ordered Energy	طاقة يمكن استخدامها بسهولة للقيام بشغل.
الطاقة النسبية	Relativistic Energy	طاقة جسم وفقا لقوانين نسبية الحركة ومشتملة لطاقة سكونه.
طاقة داخلية	Internal Energy	مجموع الطاقة الحرارية لجسم وأي طاقة كامنة أخرى مختزنة بأكملها داخل الجسم.
طاقة فيرمي	Fermi Energy	طاقة إلكترون في مستوى فيرمي.
طاقة كامنة مرنة	Elastic Potential Energy	الطاقة المختزنة في القوى داخل جسم مرن مشوّه.
الطبقة الحدية	Boundary Layer	منطقة رفيعة من المائع بالقرب من سطح ولا تتحرك بالسرعة القصوى لتدفق الهواء المحيط بسبب مقاومة اللزوجة.
طور	Phase	شكل من أشكال المادة، مثل الصلب والسائل والغاز والبلازما.
الطول الموجي	Wavelength	خاصية لشكل الموجة، ويقابل المسافة الفاصلة بين قمم أو قيعان متجاورة.
طيف الجسم الأسود	Blackbody Spectrum	توزيع الإشعاع الحراري الكهرومغنطيسي المنبعث من جسم أسود. هذا التوزيع هو مقدار الإشعاع المنبعث عند كل طول موجي ويعتمد على درجة حرارة الجسم الأسود فقط.
عازل	Insulator	جامد يقع مستوى فيرمي فيه داخل فجوة شريطية.
العازل الكهربائي	Electrical Insulator	مادة تمنع أي محصلة لحركة الشحنة الكهربائية من المرور خلالها.
عدد F	F – Number	النسبة بين البُعد البؤري لعدسة وفتحتها الفعلية.
العدد الذري	Atomic Number	عدد البروتونات الموجودة في النواة الذرية ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة.
عدد رينولدز	Reynolds Number	عدد بلا أبعاد يصف تدفق مائع خلال نظام. عند أعداد رينولدز المنخفضة، تهيمن لزوجة المائع على التدفق، بينما عند أعداد رينولدز المرتفعة يهيمن القصور الذاتي للمائع عليه.
العدسة	Lens	جهاز بصري شفّاف يستخدم الانكسار لتغير مسار الضوء، في الغالب لتكوين صور.
العدسة المجمّعة	Converging Lens	عدسة تحرف أشعة الضوء الفردية المارة خلالها نحو بعضها البعض بحيث إما أن تتجمّع بشكل أكبر من السابق أو على الأقل تنفرج بشكل أقل عن بعضها البعض. العدسة المجمّعة لها بُعد بؤري موجب وفي الغالب تنتج صوراً حقيقية.
العدسة المفرّقة	Diverging Lens	عدسة تحرف أشعة الضوء الفردية المارة خلالها بعيدا عن بعضها البعض بحيث إما أن تتجمّع بشكل أقل من السابق أو لا تتجمّع على الإطلاق. العدسة المجمّعة لها بُعد بؤري سالب وفي الغالب تنتج صوراً خيالية.
عرض النطاق	Bandwidth	مدى من الترددات ضمن مجموعة من الموجات الكهرومغنطيسية.
عزم الدوران	Torque	مؤثر إذا بُذل على جسم حر يتسبب أساساً في تسارع زاوي للجسم. العزم الدوراني هو كمية متجهة، يحتوي على كل من مقدار العزم الدوراني واتجاهه. وحدة العزم الدوراني في النظام العالمي للوحدات Si هي نيوتن · متر.
عزم القصور الذاتي	Moment Of Inertia	الكتلة الدورانية.
عُقد الاهتزاز	Vibrational Node	منطقة في الجسم المهتز لا تتحرك على الإطلاق.
عمر النصف	Half-Life	الزمن المطلوب لخضوع نصف الأنوية في نظير إشعاعي معيّن لاضمحلال إشعاعي.
عمودي	Normal	يتجه بعيدا عن سطح مباشرة (بشكل عمودي). الخط العمودي على سطح ويلتقي مع السطح بزاوية قائمة.
الغاز الخامل	Inert Gas	غاز يحتوي على ذرات غير نشطة كيميائيا وفي النادر ترتبط بشكل دائم مع ذرات أو جزيئات أخرى. من الغازات الخاملة الهيليوم والنيون والأرجون والكريبتون والزينون.
الغاز أو الغازي	Gas Or Gaseous	شكل من أشكال المادة يتكوّن من جسيمات صغيرة جدا فردية (ذرات أو جزيئات) تسير بشكل مستقل. يأخذ الغاز شكل وحجم وعائه.

الغليان	Boiling	تسارع في التبخّر يحدث عندما تتشكّل فقاعات مستقرة من الحالة الغازية وتكبر داخل الحالة السائلة لمادة.
غير قابل للانضغاط	Incompressible	مادة لا تتغيّر كثافتها بشكل كبير عندما يتغيّر ضغطها. السوائل والجوامد هي غير قابلة للانضغاط بما أن كثافاتها تتغيّر بشكل طفيف جدا عندما تتغيّر ضغوطها بشكل كبير جدا.
فاراد (F)	Farad (F)	وحدة السعة الكهربائية في النظام العالمي Si. المكثّف الذي سعته ١ فاراد سيكون له فرق في الفولطية بين لوحيه مقداره 1 فولت عند تخزين 1 كولوم من الشحنة المنفصلة الموجبة والسالبة على كل لوح.
الفائدة الميكانيكية	Mechanical Advantage	العملية التي تقوم بواسطتها أداة ميكانيكية بإعادة توزيع مقادير القوة والمسافة المتطلبة لتأدية مقدار معين من الشغل الميكانيكي.
فائق التسخين	Superheated	تسخين فوق درجة الحرارة التي يجب أن يحدث عندها تحوّل في الطور. ينتج التسخين الفائق من إخفاق التنوّي في الطور الجديد.
فتحة العدسة	Aperture	القطر أو القطر الفعلي لعدسة أو فتحة.
فجوة الشريط	Band Gap	مدى من الطاقات في الجامد لا يتوفّر فيه أي مستويات.
الفرملة	Bremsstrahlung	عملية ينبعث فيها إشعاع كهرومغنطيسي من شحنة تتسارع بسرعة، في الغالب يحتوي على فوتونات أشعة إكس أو أشعة جاما.
الفرّومغنطيس	Ferromagnetic	يتكوّن من ذرات مغنطيسية جميعها لها نفس الاتجاه المغنطيسي داخل النطاق المغنطيسي.
الفلورة	Fluorescence	انبعاث للضوء يتبع مباشرة امتصاصاً للضوء.
فلورة أشعة إكس	X-Ray Fluorescence	العملية التي يقوم فيها إلكترون في مدار من المدارات الخارجية للذرة بانتقال إشعاعي إلى مدار داخلي فارغ، باعثا أثناء ذلك فوتون أشعة إكس.
الفهرنهايت	Fahrenheit	مقياس درجة حرارة تُعرّف فيه 32°F على أنها نقطة ذوبان الماء وتُعرّف 212°F على أنها نقطة غليان الماء عند مستوى سطح البحر. الصفر المطلق هو 459.67°F-.
الفوتودايود (الدايود الضوئي)	Photodiode	دايود يسمح للتيار بأن يتدفق عكسيا خلال وصلة م - س عندما تتعرّض لضوء. يوفر الضوء الطاقة اللازمة لتحريك الشحنات عبر منطقة نضوب الوصلة في الاتجاه المعاكس. التيار المتدفق في الاتجاه المعاكس خلال الفوتودايود يتناسب مع شدة الضوء.
فوتون	Photon	جسيم أو كمية ضوئية، لها طاقة وكمية حركة ولكن ليس لها كتلة.
الفوضى	Chaos	سلوك لا يمكن التنبؤ به تؤدي فيه التغيرات الطفيفة في الترتيب الأولي للنظام إلى ترتيبات نهائية مختلفة تماما. تكبر هذه الاختلافات مع مرور كل ثانية.
فولت - لكل - متر (V/M)	Volt-Per-Meter (V/M)	وحدة المجال الكهربائي في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لنيوتن - لكل - كولوم).
فولت (V)	Volt (V)	وحدة الفولطية في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لجول - لكل - كولوم). فولطية الطرف الموجب في البطارية المألوفة هي 1.5 فولت فوق فولطية الطرف السالب.
فولطية	Voltage	الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة لكل وحدة شحنة كهربائية موجبة عند موقع معيّن. وحدة الفولطية في النظام العالمي للوحدات Si هي فولت.
فولطية جذر متوسط المربع	Root Mean Square	مقياس لفولطية Ac يُعرّف كفولطية Dc التي تُحدث نفس استهلاك الطاقة المتوسط في جهاز أومي.
قابل للانشطار	Fissionable	قابل للخضوع لانشطار مستحثّ.
قابل للانضغاط	Compressible	مادة تتغيّر كثافتها بشكل كبير عندما يتغيّر ضغطها. الغاز مادة قابلة للانضغاط بما أن كثافته تتناسب مع ضغطه.
قاع	Trough	قمة انحراف سالب لنظام ممتد يواجه موجة.
قاعدة اليد اليمنى	Right-Hand Rule	اتفاقية يتم من خلالها تحديد اتجاه السرعة الزاوية لجسم. وفقا لهذه القاعدة، إذا عكفت أصابع يدك اليمنى لكي تشير في اتجاه دوران الجسم، فإن إبهامك

		سيشير في اتجاه السرعة الزاوية.
قاعدة داعمة	Base Of Support	سطح محدد على الأرض بالنقاط التي يُدعم الجسم عندها.
القانون الأول للديناميكا الحرارية	First Law Of Thermodynamic	التغيّر في الطاقة الداخلية لجسم ساكن يساوي الحرارة المنتقلة لذلك الجسم ناقص الشغل الذي يبذله الجسم على بيئته المحيطة. هذا القانون إعادة لنص قانون حفظ الطاقة.
القانون الثالث للديناميكا الحرارية	Third Law Of Thermodynamic	حينما تقترب درجة حرارة جسم من الصفر المطلق، فإن الانتروبي الخاص به يقترب من الصفر يشير هذا القانون إلى أن الصفر المطلق هو حالة لا يمكن الوصول إليها ولا يمكن انتزاع جميع الفوضى من الجسم.
القانون الثاني للديناميكا الحرارية	Second Law Of Thermodynamics	إن الانتروبي لمنظومة من أجسام معزولة حراريا لا يتناقص أبدا. يدرك هذا القانون أنه من السهل إنشاء اضطراب ولكن من الصعب إعادة النظام.
قانون الجاذبية العامة	Law Of Universal Gravitation	كل جسم في الكون يجذب كل جسم آخر في الكون بقوة مساوية لثابت الجاذبية مضروبا في حاصل ضرب الكتلتين، ومقسوما على مربع المسافة التي تفصل بين الجسمين.
القانون الصفري للديناميكا الحرارية	Zeroth Law Of Thermodynamic	الجسمان اللذان في وضع اتزان حراري مع جسم ثالث يكونان أيضا في وضع اتزان حراري مع بعضهما. هذا القانون هو أساس لنظام درجات حرارة ذي معنى.
قانون الغاز المثالي	Ideal Gas Law	القانون الذي يربط بين ضغط ودرجة حرارة وكثافة جسيمات غاز مثالي. الغاز المثالي هو غاز يتكوّن من جسيمات مستقلة عن بعضها البعض تماما. لا تلتصق الجسيمات ببعضها البعض، وترتد من على بعضها البعض تماماً.
قانون أوم	Ohm's Law	ملاحظة أن الهبوط الفولطي عبر موصّل كهربائي اعتيادي يتناسب مع كل من التيار الكهربائي المار خلاله ومقاومته الكهربائية.
قانون بوازيل	Poiseuille's Law	إن حجم المائع المتدفق خلال أنبوب اسطواني في كل ثانية يساوي (Π/128) مضروبا في فرق الضغط عبر ذلك الأنبوب مضروبا في قطر الأنبوب للأس الرابع، مقسوما على طول الأنبوب مضروبا في لزوجة المائع.
قانون ستيفان - بولتزمان	Stefan-Boltzmann Law	المعادلة التي تربط القدرة المنبعثة لسطح بانبعاثيته ودرجة حرارته ومساحة سطحه.
قانون كولوم	Coulomb's Law	مقدار القوى الكهروستاتيكية بين جسمين يساوي ثابت كولوم مضروبا في حاصل ضرب شحنتيهما الكهربائية مقسوما على مربع المسافة الفاصلة بينهما. إذا كانت الشحنتان متشابهتين، فإن القوى تنافرية. إذا كانت الشحنتان متعاكستين فإن القوى تجاذبية.
قانون كيبلر الأول	Kepler's First Law	تتحرك جميع الكواكب في مدارات قطع ناقصة، مع وجود الشمس في إحدى بؤرتي القطع الناقص.
قانون كيبلر الثالث	Kepler's Third Law	مربع الزمن الدوري المداري لكوكب يتناسب مع مكعب متوسط بُعد ذلك الكوكب عن الشمس.
قانون كيبلر الثاني	Kepler's Second Law	الخط الممتد من الشمس إلى كوكب يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية.
قانون لنز	Lenz's Law	عندما يحث مجال مغنطيسي متغيّر تياراً في موصل، فإن المجال المغنطيسي من ذلك التيار يعارض دائما التغيّر الذي أحدثه.
قانون نيوتن الأول للحركة	Newton's First Law Of Motion	الجسم غير الخاضع لأي قوة خارجية يتحرك بسرعة ثابتة، ويقطع مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية على طول مسار خط مستقيم.
قانون نيوتن الأول	Newton's First Law Of Rotational Motion	الجسم غير المترنح وغير الخاضع لأي عزم دوراني خارجي يدور بسرعة للحركة الدورانية زاوية ثابتة، فيدور مغزليا بثبات حول محور دوران ثابت.
قانون نيوتن الثالث للحركة	Newton's Third Law Of Motion	لكل قوة يؤثر بها جسم على جسم آخر، فإنه يوجد قوة أخرى مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه يؤثر بها الجسم الآخر على الجسم الأول.
قانون نيوتن الثالث	Newton's Third Law Of Rotational Motion	لكل عزم دوراني يبذله جسم على جسم آخر، يوجد عزم دوراني آخر للحركة الدورانية مساوٍ

		في المقدار ومعاكس في الاتجاه يبذله الجسم الآخر على الجسم الأول.
قانون نيوتن الثاني للحركة	Newton's Second Law Of Motion	تسارع جسم يساوي القوة المؤثرة عليه مقسومة على كتلته. يمكن معالجة هذه المساواة جبريا لكي ينصّ القانون على أن القوة المؤثرة على الجسم تساوي حاصل ضرب كتلة الجسم في تسارعه (معادلة ١،١،٢).
قانون نيوتن الثاني	Newton's Second Law Of Rotational Motion	التسارع الزاوي لجسم يساوي العزم الدوراني المبذول على الجسم للحركة الدورانية مقسوما على كتلته الدورانية. يمكن معالجة هذه المساواة جبريا لكي ينص القانون على أن العزم الدوراني على الجسم يساوي حاصل ضرب الكتلة الدورانية للجسم بتسارعه الزاوي (معادلة ٢،١،٢). لا ينطبق القانون على الأجسام المترنحة.
قانون هوك	Hooke's Law	القانون العام الذي يُغطي سلوك الزنبرك والمرونة. ينص قانون هوك على أن الزنبرك يبذل قوة إرجاع تتناسب مع مقدار تشوّه الزنبرك عن طوله المتزن.
القدرة	Power	مقياس سرعة بذل شغل على جسم. وحدة القدرة في النظام العالمي للوحدات Si هي الواط.
القشرة	Shell	مجموعة من المدارات الذرية التي لها طاقات متشابهة.
القصور الذاتي	Inertia	خاصية للمادة تجعلها تظل ساكنة أو متحركة بحركة منتظمة في نفس الخط المستقيم ما لم يؤثر عليها بقوة خارجية.
القصور الذاتي الدوراني	Rotational Inertia	خاصية للمادة بحيث تظل في حالة سكون أو في حالة دوران ثابت حول نفس محور الدوران ما لم يؤثر عليها عزم دوراني خارجي.
قصوري	Inertial	يتحرك بسبب القصور الذاتي فقط وبالتالي غير متسارع.
قطب مغنطيسي	Magnetic Pole	خاصية في الطبيعة تُنشئ قوى مغنوستاتيكية بين الأقطاب المغنطيسية. يمكن أن يكون لقطب معيّن كمية موجبة من القطب المغنطيسي (قطب شمالي) أو كمية سالبة (قطب جنوبي). وحدة القطب المغنطيسي في النظام العالمي للوحدات Si هي أمبير · متر.
قطب مغنطيسي أحادي	Magnetic Monopole	قطب مغنطيسي معزول، إما شمال أو جنوب. لم يُشاهد أي منها على الإطلاق.
القمة	Crest	قمة انحراف موجب لنظام ممتد يواجه موجة.
قوانين الحركة النسبية	Relativistic Laws Of Motion	قوانين الحركة في النظرية النسبية الخاصة. تعدّل هذه القوانين النقص الموجود في قوانين نيوتن للحركة وتظهر في الأصل عند السرعات القريبة من سرعة الضوء.
قوانين الديناميكا الحرارية	Laws Of Thermodynamics	القوانين الأربعة التي تحكم حركة الحرارة بين الأجسام.
القوة	Force	تأثير إذا بُذل على جسم حر يتسبب أساساً في تسارع الجسم وبعض الأحيان في تشوّهه وتأثيرات أخرى. القوة هي كمية متجهة، تتكوّن من كل من مقدار القوة واتجاهها. وحدة القوة في النظام العالمي Si هي النيوتن.
قوة إرجاع	**Restoring Force**	قوة تعمل على إعادة جسم لشكله المتزن. تتجه قوة الإرجاع نحو الموقع الذي شغله الجسم عندما كان عند شكله المتزن.
قوة الأثر الانحرافي	**Wake Deflection Force**	قوة رفع تواجهها كرة ملتفة عندما تحرف أثرها الاضطرابي لجانب واحد. تشير قوة الأثر الانحرافي نحو جانب الكرة المتحرك بعيدا عن التيار الهوائي المتدفق.
قوة الجذب المركزي	**Centripetal Force**	قوة تؤثر على جسم تشير نحو المركز. القوة المركزية ليست قوة مستقلة لكنها في الواقع مجموع لقوى أخرى، مثل الجاذبية، تؤثر على الجسم.
القوة الدافعة الكهربائية العكسية	Back Emf	قوة دافعة كهربائية مستحثّة ذاتيا تتطوّر في المحثّ عندما يتغيّر تياره أو في ملف نظام كهروميكانيكي مثل المحرك عندما يتسبب تياره في تحريك المغنطيسات.
القوة الدافعة الكهربائية المستحثّة	Induced Emf	إجمالي الفرق في الفولطية بين طرفي ملف، ناتج عن مجال مغنطيسي متغير في ذلك الملف والمجال الكهربائي الناتج من ذلك.
القوة نووية الضعيفة	Weak Force	القوة الأساسية التي تسمح للإلكترونات والنيوترينونات بالتفاعل وهي المسؤولة عن اضمحلال بيتا.
قوة الطفو	Buoyant Force	القوة المبذولة للأعلى من المائع على جسم مغمور في ذلك المائع. تنشأ قوة الطفو نتيجة الضغط من المائع. هذا الضغط يكون أعلى ما يمكن تحت الجسم بحيث

تكون القوة المبذولة للأعلى على قاع الجسم أكبر من القوة المبذولة للأسفل على قمة الجسم.

القوة العمودية	Normal Force	القوة الداعمة.
القوة نووية القوية	Strong Force	القوة الأساسية التي تُعطي ترتيباً للأنوية والنيوكلونات وهي أساس للقوة النووية.
القوة الكهروستاتيكية	Electrostatic Force	القوة التي يواجهها جسيم مشحون في ظل وجود جسيمات مشحونة أخرى.
القوة المغنوستاتيكية	Magnetostatic Force	القوة التي يواجهها قطب مغنطيسي في ظل وجود أقطاب مغنطيسية أخرى.
قوة داعمة	Support Force	قوة تُبذل عندما يتلامس جسمان. يبذل كل جسم قوة على الجسم الآخر لمنعه من المرور خلاله. القوى الداعمة دائما عمودية على أسطح الأجسام.
قوة شبيهة بالزنبرك	Springlike Force	قوة تتناسب مع الإزاحة، وفقا لقانون هوك.
قوة لورنتز	Lorentz Force	القوة التي يواجهها جسيم مشحون عندما يتحرك خلال مجال مغنطيسي.
قوة ماغنس	Magnus Force	قوة رفع يواجهها جسم ملتف أثناء تحركه خلال مائع. اتجاه قوة ماغنس هو نحو جانب الكرة المتحرك بعيدا عن التيار الهوائي المندفع.
قوة نووية	Nuclear Force	قوة تجاذبية تربط النيوكلونات سوية مع بعضها بمجرد أن تتلامس.
القوى الأساسية	Fundamental Forces	القوى الأربعة الأساسية التي تعمل بين الأجسام في الكون، وهي القوة الكتلية الجذبية والقوة الكهرومغنطيسية والقوة النووية القوية والقوة النووية الضعيفة.
قوى الديناميكا الهوائية	Aerodynamic Forces	القوى المبذولة على جسم نتيجة حركة الهواء المحيط به. هناك نوعان للقوى الديناميكا الهوائية هما قوى الرفع وقوى المقاومة.
قوى الرفع	Lift Forces	قوى مبذولة من مائع على جامد تكون عمودية على تدفق المائع حول ذلك الجامد.
قوى اللزوجة	Viscous Forces	القوى المبذولة داخل مائع والتي تعارض الحركة النسبية. تبذل طبقات المائع التي تتحرك عبر بعضها البعض قوى لزوجة على بعضها البعض.
قوى المد والجزر	Tidal Forces	الفروق بين جاذبية جرم سماوي عند مواضع معيّنة على سطح جسم ثانٍ ومتوسط تلك الجاذبية على الجسم الثاني بأكمله. تميل قوى المد والجزر إلى تمديد الجسم الثاني ليأخذ شكلاً بيضاوياً.
قوى المقاومة	Drag Forces	القوى الشبيهة بالاحتكاك المبذولة من مائع وجسم صلب على بعضهما البعض أثناء تحرك الجسم الصلب خلال المائع. تعمل هذه القوى على تقليل السرعة النسبية بين الاثنين.
كالفن	**Kelvin**	مقياس لدرجة الحرارة المطلقة في النظام العالمي Si، تُعرّف فيه 0K على أنها الصفر المطلق. المسافات بين وحدات هذا المقياس هي نفس المسافات المستخدمة في مقياس السلزيوس.
الكتلة	**Mass**	خاصية للجسم وهي مقياس قصوره أو مقاومته للتسارع، وفي الشائع تُعتبر مقدار المادة التي يحتويها الجسم، والتي تتسبب في جعل ثقل له في مجال الجاذبية. وحدة الكتلة في النظام العالمي للوحدات Si هي الكيلوجرام.
كتلة الجاذبية	**Gravitational Mass**	الكتلة المرتبطة بالتجاذب الكتلي بين الأجسام.
الكتلة الحرجة	**Critical Mass**	مقدار من كتلة مادة قابلة للانشطار قادر على إبقاء تفاعل تسلسلي مستمرا. يعتمد مقدار الكتلة المتطلبة على كتلتها، وشكلها، وكثافتها.
الكتلة الدورانية	**Rotational Mass**	خاصية للجسم يكون مقياساً لقصوره الذاتي الدوراني. تتحدّد الكتلة الدورانية للجسم عن طريق كتلته ومقدار بُعد هذه الكتلة عن محور الدوران. وحدة الكتلة الدورانية في النظام العالمي للوحدات Si هي كيلوجرام · متر^2.
كتلة القصور الذاتي	Inertial Mass	الكتلة المرتبطة بالقصور الذاتي لجسم، أي مقاومته للتسارع.
كتلة دون حرجة	Subcritical Mass	جزء من مادة قابلة للانشطار صغير جدا لا يستطيع أن يُبقي التفاعل التسلسلي مستمرا.
كتلة فوق حرجة	Supercritical Mass	جزء من مادة قابلة للانشطار يفيض عن الكتلة الحرجة وبالتالي يخضع لتفاعل تسلسلي انفجاري.
الكثافة	Density	كتلة جسم مقسومة على حجمه. وحدة الكثافة في النظام العالمي Si هي كيلوجرام –

		لكل – متر^{3}.
كثافة الجسيمات	Particle Density	عدد الجسيمات في جسم مقسوما على حجمه. كثافة الجسيمات للماء هي حوالي 3.35×10^{28} جزيء – لكل – متر^{3}. كثافة الجسيمات للهواء عند سطح البحر هي حوالي 2.687×10^{25} جزيء – لكل – متر٣.
كمّات	Quanta	الوحدات الأساسية والمنفردة التي ينبعث بها شيء ما أو يُمتص أو يُشاهد، والتي تعكس الخاصية الجسيمية لذلك الشيء.
كمية الحركة	Momentum	كمية الحركة الخطية.
كمية الحركة الخطية	Linear Momentum	كمية متجهة محفوظة تقيس حركة الجسم. وهي حاصل ضرب كتلة ذلك الجسم في سرعته. وحدة كمية الحركة في النظام العالمي للوحدات Si هي كيلوجرام · متر– لكل – ثانية.
كمية الحركة الزاوية	Angular Momentum	كمية متجهة محفوظة تقيس الحركة الدورانية لجسم. هي حاصل ضرب الكتلة الدورانية للجسم في سرعته الزاوية. وحدة كمية الحركة الزاوية في النظام العالمي Si هي كيلوجرام – متر^{2} – لكل ثانية.
كمية الحركة النسبية	Relativistic Momentum	كمية الحركة لجسم وفقا لقوانين الحركة النسبية.
كمية متجهة	Vector Quantity	كمية تصف جانباً من جوانب نظام فيزيائي تحتوي على كل من مقدار واتجاه في الفراغ.
كمية محفوظة	Conserved Quantity	كمية فيزيائية، مثل الطاقة، لا تنشأ ولا تتلف داخل نظام معزول عندما يخضع هذا النظام لتغيرات. قد تنتقل الكمية المحفوظة بين الأجسام داخل نظام معزول، لكن مقدارها الكلي يظل ثابتاً.
مغنطيس كهربائي	Electromagnet	ملف سلكي، بقلب أو بدون قلب، يُصبح مغنطيسا عندما يتدفق تيار كهربائي خلال الملف.
كولوم (C)	Coulomb (C)	وحدة الشحنة الكهربائية في النظام العالميٍ Si. الكولوم الواحد هو حوالي مليون ضعف الشحنة التي تكتسبها بدلك قدميك عبر سجادة في الشتاء.
كيلوجرام – لكل – متر^{3} (Kg/M^{3})	Kilogram-Per-Meter^{3} (Kg/M^{3})	وحدة الكثافة في النظام العالمي للوحدات Si. واحد كيلوجرام – لكل – متر^{3} هو حوالي كثافة الهواء عند ارتفاع 2000 متر (حوالي 1 ميل) فوق سطح البحر.
الكيلوجرام (Kg)	Kilogram (Kg)	وحدة الكتلة في النظام العالمي Si. (الكيلوجرام القياسي هو أسطوانة من البلاتين والإريديوم محتفظة في الدائرة العالمية للأوزان والمقاييس بالقرب من باريس.) لتر الماء له كتلة مقدارها 1 كيلوجرام تقريباً.
كيلوجرام · متر٢ (Kg·M٢)	Kg·M^{2}) Kilogram·M^{2})	وحدة الكتلة الدورانية في النظام العالمي Si. 1 كيلوجرام · متر^{2} هو تقريبا الكتلة الدورانية لساعدك عندما تتمحور حول مرفقك.
كيلوجرام·متر – لكل – ثانية (Kg·M/S)	Kilogram·M-Per-Second (Kg·M/S)	وحدة كمية الحركة في النظام العالمي Si. واحد كيلوجرام. متر – لكل – ثانية هو حوالي كمية الحركة في كرة بيسبول تسير بسرعة 25Km/H (16Mph).
كيلوجرام·متر – لكل – ثانية^{2} (Kg·M/S^{2})	Kilogram·Meter-Per-Second^{2} (Kg·M/S^{2})	وحدة القوة في النظام العالمي Si (مرادف للنيوتن).
كيلوجرام·متر^{2} – لكل – ثانية (Kg·M^{2}/S)	Kilogram·Meter^{2}-Per-Second (Kg·M^{2}/S)	وحدة كمية الحركة الزاوية في النظام العالمي Si. واحد كيلوجرام · متر^{2} – لكل – ثانية هو حوالي كمية الحركة الزاوية لكرة بولنج كتلتها 7.3Kg (16lbm) تدور ٣٤ مرة في الثانية بينما تتدحرج في مسارها.
اللزوجة	Viscosity	مقياس لمقاومة المائع للحركة النسبية داخل المائع.
اللومن	Lumen	وحدة شائعة للمقدار الكلي للضوء المشع كما تراه العين البشرية.
المادة المضادة	Antimatter	مادة شبيهة بالمادة الطبيعية، لكن العديد من صفاتها معكوسة مثل انعكاس الشحنة الكهربائية.
مادة فسفورية	Phosphor	جامد يضيء (يبعث ضوءا) عندما تنتقل طاقة إليه عن ريق ضوء أو عن طريق تصادم بجسيم.
مادة مغنطيسية رخوة	Soft Magnetic Material	مادة يسهل مغنطتها نسبياً وتفقد مغنطيسيتها بعد إزالة المجال الممغنِط. المواد المغنطيسية الرخوة تناسب الكهرمغنطيسيات.

مادة مغنطيسية صلدة	Hard Magnetic Material	مادة يصعُب مغنطتها نسبياً، تحتفظ بمغنطيسيتها بعد إزالة المجال الممغنِط. المواد المغنطيسية الصلدة تناسب المغنطيسيات الدائمة.
مائع	Fluid	مادة لها كتلة ولكن ليس لها شكل ثابت. يمكن للمائع أن يتدفق ليشابه الوعاء الذي يوجد فيه. الغازات والسوائل كلاهما مائع.
مبدأ أرخميدس	Archimedes' Principle	ملاحظة أن الجسم المغمور جزئيا أو كليا في مائع يؤثر عليه قوة طفو للأعلى مساوية لوزن السائل الذي أزاحه.
مبدأ التكافؤ	Principle Of Equivalence	مبدأ ينص على أن كتلة الجاذبية وكتلة القصور الذاتي هي متطابقة فعليا وبالتالي لا يمكنك القيام بأي تجربة في منطقة صغيرة في الفراغ تميز بين السقوط الحر وانعدام الجاذبة.
مبدأ باسكال	Pascal's Principle	التغير في ضغط مائع محصور وغير قابل للانضغاط ينتقل لكل أجزاء المائع وإلى أسطح حاويته دون أي فقد.
مبدأ باولي للاستبعاد	Pauli Exclusion Principle	خاصية مشاهدة في الطبيعة فيها أن جسيمات فرمي التي لا يمكن تمييزها يجب أن يكون لها موجاتها الكميّة الفريدة.
مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ	Heisenberg Uncertainty Principle	قانون فيزيائي كمّي ينص على أن موقع جسم (خاصية جسيمية) وكمية حركته (خاصية موجية) لا يمكن تحديدهما بدقة في الوقت ذاته. يُعطي هذا المبدأ الأجسام ذات الكتل الصغيرة خاصية عدم وضوح.
مبدّل الحرارة	Heat Exchanger	أداة تسمح بانتقال الحرارة بشكل طبيعي من مادة أسخن إلى مادة أبرد دون أي تبادل فعلي لتلك المواد.
المتذبذب التوافقي	Harmonic Oscillator	متذبذب تتناسب فيه قوة الإرجاع على جسم مع إزاحته عن اتزانه المستقر. لا يعتمد الزمن الدوري لمتذبذب توافقي على سعة حركته.
المتذبذب اللاتوافقي	Anharmonic Oscillator	متذبذب لا تتناسب فيه قوة الإرجاع على جسم مع إزاحته عن الاتزان المستقر. يعتمد الزمن الدوري لمتذبذب لاتوافقي على سعة حركته.
متذبذب ليزري	Laser Oscillator	مضخّم ليزري مُحاط بمرايا بحيث يمكنه تضخيم فوتون أو أكثر منبعث تلقائيا لتكوين شعاع عالي الشدة من الضوء المترابط.
متر - لكل - ثانية (M/S)	Meter-Per-Second (M/S)	وحدة السرعة أو مقدار السرعة في النظام العالمي للوحدات Si. واحد متر- لكل - ثانية هو حوالي سرعة المشي المعتاد أو تقريبا 2.2 Mph.
متر - لكل - ثانية^2 (M/S^2)	Meter-Per-Second^2 (M/S^2)	وحدة التسارع في النظام العالمي للوحدات Si. واحد متر - لكل ثانية٢ هو تقريبا تسارع مصعد حينما يبدأ بحركته للأعلى.
المتر (M)	Meter (M)	وحدة الطول أو المسافة في النظام العالمي للوحدات Si. (يُعرّف المتر الواحد رسميا بالمسافة التي يقطعها ضوء خلال الفراغ في 1/ 299,792,458 من الثانية.) المتر الواحد هو تقريباً طول خطوة واسعة أو حوالي 3.28 قدم.
متر^2 (M^2)	Meter^2 (M^2)	وحدة المساحة في النظام العالمي للوحدات Si. واحد متر مربع هو ضعف مساحة صحيفة إخبارية مفتوحة.
متر^3 (M^3)	Meter^3 (M^3)	وحدة الحجم في النظام العالمي للوحدات Si. واحد متر مكعب هو حوالي حجم خزينة ملفات ذات أربعة أدراج.
متعادل كهربائيا	Neutral	جسم له محصلة شحنة كهربائية صفرية.
متفق الطور	In Phase	علاقة بين موجتين تكملان نفس أجزاء دورتهما التذبذبية عند نفس المكان والزمان.
المجال الكهربائي	Electric Field	خاصية لكل نقطة في الفراغ تبذل قوى على جسيمات مشحونة كهربائيا. للمجال الكهربائي مقدار واتجاه يتناسب مع القوة التي يبذلها على وحدة شحنة كهربائية موجبة عند ذلك الموقع. في حين تتكوّن المجالات الكهربائية في الغالب من الشحنات المجاورة، إلا أنها يمكن أن تتكوّن من ظواهر كهرومغنطيسية أخرى. وحدة المجال الكهربائي في النظام العالمي Si هي الفولت - لكل - متر أو الوحدة المكافئة نيوتن - لكل - كولوم.

المجال المغنطيسي	Magnetic Field	خاصية لكل نقطة في الفراغ تبذل قوى على الأقطاب المغنطيسية. للمجال المغنطيسي مقدار واتجاه يتناسب مع القوة التي يبذلها على وحدة من قطب شمالي عند ذلك الموضع. وحدة المجال المغنطيسي في النظام العالمي للوحدات Si هي تسلا.
المحاثّة	Inductance	الهبوط الفولطي عبر ملف حثّي مقسوما على معدل تغيّر التيار في ذلك الملف بالنسبة للزمن. وحدة المحاثّة في النظام العالمي Si هي الهنري.
محرّك حراري	Heat Engine	أداة تحوّل الطاقة الحرارية إلى شغل حينما تتدفق الحرارة من جسم ساخن إلى جسم بارد.
محصلة الشحنة الكهربائية	Net Electric Charge	مجموع جميع الشحنات التي على جسم، الموجبة والسالبة. تزيد الشحنات الموجبة من محصلة الشحنة بينما تقللها الشحنات السالبة. يمكن أن تكون محصلة الشحنة سالبة.
محصلة العزم الدوراني	Net Torque	مجموع جميع العزوم الدورانية المؤثرة على جسم، أخذا في الاعتبار كل من مقدار واتجاه كل عزم دوراني منفرد. مقدار محصلة العزم الدوراني أقل من مجموع العزوم الدورانية المنفردة، بما أنها كثيراً ما تُعارض بعضها البعض في الاتجاه.
محصلة القطب المغنطيسي	Net Magnetic Dipole	مجموع جميع الأقطاب على جسم، الشمالية والجنوبية. بما أنه لا يوجد أي قطاب مغنطيسية معزولة، فإن محصلة القطب المغنطيسي لجسم هي دائما صفر.
محصلة القوة	Net Force	مجموع جميع القوى المؤثرة على جسم، أخذا في الاعتبار كل من مقدار واتجاه كل قوة منفردة. كثيراً ما يكون مقدار محصلة القوة أقل من مجموع مقادير القوى المنفردة، بما أنها كثيراً ما تُعارض بعضها البعض في الاتجاه.
محور الدوران	Axis Of Rotation	خط مستقيم في الفراغ يدور حوله جسم أو مجموعة من الأجسام. أكثر تحديدا، يشير محور الدوران في اتجاه محدّد على طول ذلك الخط ليعكس معنى الدوران وفقا لقاعدة اليد اليمنى.
محوّل	Transformer	جهاز يستخدم مجالات مغنطيسية لنقل القدرة الكهربائية من دائرة كهربائية لدائرة كهربائية أخرى. الدائرتان معزولتان كهربائياً بما أنه في الحقيقة لا تنتقل أي شحنات بين الدائرتين.
مختلفتان في الطور	Out Of Phase	العلاقة بين موجتين تكملان أجزاءً متعاكسة من دورتيهما التذبذبية عند نفس المكان والزمان.
المدار	Orbit	المسار الذي يتبعه جسم بينما يتحرّك في ظل وجود قوة مركزية.
مداري	Orbital	موجة موقوفة لإلكترون في الذرة، أحد الأنماط الأساسية لموجة الإلكترون المسموح بها في الذرة من قِبل الفيزياء الكميّة.
المركبات	Components	أجزاء من مقدار كمية متجهة والتي تمتد على طول اتجاهات معيّنة.
مركز الثقل	Center Of Gravity	النقطة الفريدة التي يتمركّز حولها ثقل الجسم بالتساوي وبالتالي يتوازن. لأن الثقل يتناسب مع الكتلة، فإن مركز الكتلة هو مطابق لمركز الثقل للأجسام الأصغر كثيراً من الأرض. بالنسبة للأجسام الأكبر، يختلف مركز الكتلة عن مركز الثقل بشكل طفيف. الجسم المعلّق من مركز ثقله سيتوازن ولن يواجه أي عزم دوراني بسبب الجاذبية. في العديد من الحالات، يمكنك أن تتنبأ بدقة عن سلوك جسم بفرض أن جميع وزن الجسم يعمل في مركز ثقله.
مركز الطرق	Center Of Percussion	النقطة المميزة على مضرب البيسبول أو مضرب التنس والتي عند اصطدام جسم بها لن يحدث أي تسارع في مقبض المضرب.
مركز الكتلة	Center Of Mass	النقطة الفريدة التي تتوازن حولها كتلة الجسم. مركز الكتلة هي نقطة الارتكاز الطبيعية لجسم حرّ. في ظل غياب قوى خارجية أو عزوم دوران، فإن مركز كتلة جسم صلب يسير بسرعة ثابتة بينما يدور الجسم بسرعة زاوية ثابتة حول مركز الكتلة.
مرن	Soft	زنبرك له ثابت زنبرك صغير وبالتالي يواجه قوى إرجاع صغيرة استجابة للتشوّهات الكبيرة.

مساحة السطح	Surface Area	امتداد سطح ذي بُعدين مقيّد بحدود معينة. وحدة مساحة السطح في النظام العالمي للوحدات Si هي متر^2.
مسار	Trajectory	الطريق الذي يتبعه جسم أثناء حركته.
مستقطبة استوائيا	Plane Polarized	موجة ضوئية يتذبذب فيها المجال الكهربائي (والمجال المغنطيسي) ذهابا وإيابا في مستوى بينما تتحرك الموجة خلال الفراغ.
المستوى	Level	موجة موقوفة لإلكترون في جامد، وهي أحد أبسط أنماط موجة الإلكترون في الجامد المسموح بها في الفيزياء الكمّية.
مستوى التوصيل	Conduction Level	مستوى كمّي في عازل يتطلّب طاقة أكبر من مستوى فيرمي ويكون في العادة خاليا من الإلكترونات.
مستوى تكافؤ	Valence Level	مستوى كمّي في عازل، يتطلّب طاقة أقل من مستوى فيرمي، ويكون في العادة مشغولاً بالإلكترونات.
مستوى فيرمي	Fermi Level	مستوى افتراضي يقع في المنتصف بين أعلى مستوى ممتلئ وأقل مستوى غير ممتلئ في المادة الصلبة.
مشبّع	Saturated	في حالة اتزان طور مع طور آخر للمادة. يكون الطور الغازي لمادة مشبّعا عندما يكون في اتزان طور مع الطور السائل و/أو الصلب لتلك المادة.
مضخة حرارة	Heat Pump	أداة تضخ الحرارة عكس اتجاه تدفقها الطبيعي، فتنتقل الحرارة من جسم بارد إلى جسم ساخن. لتحقيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية، تحوّل مضخة الحرارة في العادة بعضا من الطاقة المنتظمة إلى طاقة حرارية.
المضخّم	Amplifier	جهاز ينسخ الإشارة الداخلة لتصبح إشارة خارجة أكبر.
مضخّم ليزري	Laser Amplifier	جهاز يضخّم الضوء الداخل الضعيف لإنتاج ضوء خارج أكثر سطوعا. الضوء الخارج هو نسخة أكثر سطوعا من الضوء الداخل.
مطرقة ماء	Water Hammer	اصطدام كتلة متحركة من الماء تم إيقافها فجأة.
مُطعَم	Doped	معدَّل بإضافة شوائب كيميائية تغيّر من خصائصه الفيزيائية.
معادلة العدسة	Lens Equation	المعادلة التي تربط بين البُعد البؤري للعدسة وأبعاد الجسم والصورة.
معادلة برنولي	Bernoulli's Equation	معادلة تربط الطاقة الكلية لمائع غير قابل للانضغاط في تدفق حالة الاستقرار مع مجموع طاقة ضغطه الكامنة، وطاقته الحركية، وطاقة جذبه الكامنة.
معامل الارتداد	Coefficient Of Restitution	مقياس حيوية الكرة، يحدده ارتداد الكرة من سطح صلب غير متحرك. وهو النسبة بين سرعة ارتداد الكرة وسرعة تصادمها.
معامل الانكسار	Index Of Refraction	معامل انخفاض سرعة الضوء في مادة بالنسبة لسرعة الضوء في الفراغ، وهو يساوي سرعة الضوء في الفراغ مقسومة على سرعته في المادة.
معامل التمدد الحجمي	Coefficient Of Volume Expansion	التغيّر الجزئي في حجم جسم نتيجة زيادة درجة الحرارة بمقدار 1°C.
المعاوقة	Impedance	مقياس لمعارضة النظام لمرور تيار أو موجة.
معاوقة غير موائمة	Impedance Mismatch	تغيّر مفاجئ في المعارضة لمرور موجة، في الغالب يرافقه انعكاسات.
المعايرة	Calibration	عملية مقارنة مرجع جسم محلي بمقياس مقبول أكثر عمومية.
معدن	Metal	جامد يقع مستوى فيرمي فيه داخل شريط من المستويات.
مغنطيس دائم	Permanent Magnet	جسم يمكن مغنطته ويُحافظ على هذه المغنطة لفترة طويلة من الزمن.
المقاومة	Resistor	مكوّن إلكتروني يعيق تدفق التيار الكهربائي، ويحوّل بعض طاقته إلى حرارة.
مقاومة الضغط	Pressure Drag	قوة المقاومة التي تنتج من وجود ضغوط أمام جسم هي أعلى من الضغوط التي خلف الجسم.
المقاومة الكهربائية	Electrical Resistance	مقياس لمقدار ممانعة جسم لتدفق التيار الكهربائي. وحدة المقاومة الكهربائية في النظام العالمي Si هي الأوم.
مقاومة اللزوجة	Viscous Drag	قوة مقاومة ناتجة من قوى لزوجة على سطح متحرك مغمور في مائع.

المقاومة الهوائية المستحثّة	Induced Drag	قوة مقاومة الهواء تحدث عندما يحرف جناح تيار الهواء المار عبره لكي يحصل على رفع.
المقدار	Magnitude	مقدار كمية فيزيائية.
مقدار السرعة	Speed	مقياس للمسافة التي يقطعها جسم في مقدار معيّن من الزمن. وحدة مقدار السرعة في النظام العالمي للوحدات Si هي المتر - لكل - ثانية.
مقدار السرعة الزاوية	Angular Speed	مقياس الزاوية التي يدور جسم خلالها في مقدار معيّن من الزمن.
مقياس درجة الحرارة المطلقة	Absolute Temperature Scale	مقياس لقياس درجة الحرارة بحيث يقابل 0K الصفر المطلق.
المكثّف	Capacitor	مكوّن إلكتروني يخزّن الشحنات الكهربائية المنفصلة على زوج من الألواح المفصولة عن بعضها بطبقة عازلة.
مكممة	**Quantized**	توجد فقط في وحدات منفردة أو كمّات. تُشاهد الكميّات الفيزيائية المكممة كمضاعفات صحيحة فقط من الوحدة الكمية الأولية.
الملف الحثّي	**Inductor**	مكوّن إلكتروني يخزّن الطاقة المغنطيسية في ملف سلكي ويُعارض تغيرات التيار في ذلك السلك.
منثلم	**Blunt**	ليس انسيابيا بحيث يتأخر المائع المتدفق حوله ويواجه انفصالاً في التدفق ومقاومة ضغطية.
المنحدر	**Ramp**	سطح مائل يسمح بالقيام بشغل على مسافة أطول، وبالتالي يتطلب قوة أقل.
منطقة النضوب	**Depletion Region**	المنطقة غير الموصلة حول وصلة م - س والتي تمتلئ فيها جميع مستويات التكافؤ بالإلكترونات ولا توجد أي إلكترونات في مستوى التوصيل.
موجات الراديو	**Radio Waves**	موجات كهرومغنطيسية، في العادة لها أطوال موجية أطول من 1 متر تقريبا.
موجات المايكروويف	**Microwaves**	موجات كهرومغنطيسية لها أطوال موجية بين حوالي 1 متر و1 ملليمتر.
موجات سطحية	**Surface Waves**	اضطرابات في الشكل المتزن المستقر لسطح.
موجات كهرومغنطيسية	**Electromagnetic Waves**	موجات تتكوّن من مجالات كهربائية ومغنطيسية وتسير خلال الفراغ بسرعة الضوء. تحمل هذه الموجات طاقة وكمية حركة وتنبعث وتُمتص كجسيمات تُسمّى فوتونات. موجات الراديو والمايكروويف والموجات تحت الحمراء والمرئية وفوق البنفسجية وأشعة إكس وأشعة جاما هي أمثلة للموجات الكهرومغنطيسية.
الموجة الميكانيكية	Mechanical Wave	حركة طبيعية وفي الغالب تناغمية لجسم ممتد حول حالة أو شكل اتزانه المستقر.
موجة صدمية	Shock Wave	منطقة ضيقة ذات ضغط مرتفع ودرجة حرارة مرتفعة تنشأ عندما تزيد سرعة جسم خلال وسط عن سرعة سير الصوت أو الموجات أو أي اهتزاز آخر خلال ذلك الوسط.
موجة طولية	Longitudinal Wave	موجة يكون فيها التذبذب الأساسي موازيا للموجة ذاتها.
موجة متحرّكة	Traveling Wave	موجة تتحرك بثبات خلال الفراغ في اتجاه معيّن.
موجة مستعرضة	Transverse Wave	موجة يكون فيها التذبذب الأساسي عموديا على الموجة ذاتها.
موجة موقوفة	Standing Wave	موجة تظل جميع عقدها وبطونها في مكانها.
الموصّل الكهربائي	Electrical Conductor	مادة تسمح للشحنة الكهربائية بالتدفق خلالها.
موصّل ضوئي	Photoconductor	جامد يكون عازلا كهربائيا في الظلام لكن يُصبح موصّلاً كهربائياً عندما يتعرّض لضوء له طول موجي مناسب.
موصل فائق	Superconductor	موصّل كهربائي يسمح للإلكترونات بالتدفق دون أن تفقد أياً من طاقتها الحركية إلى طاقة حرارية. ستستمر الإلكترونات بالتدفق في الموصل الفائق بشكل لانهائي. تصبح المواد فائقة التوصيل فقط عند درجات الحرارة المنخفضة جدا.
الموصلية الحرارية	Thermal Conductivity	مقياس لمقدرة المادة على نقل الحرارة عن طريق التوصيل من طرفها الساخن إلى طرفها البارد.
موضع الاتزان	Equilibrium Position	النقطة التي يواجه عندها الجسم محصلة قوة صفرية ولا يتسارع.
الموقع	Position	كمية متجهة تُحدِّد مكان جسم بالنسبة لنقطة ما مرجعية. تحتوي على كل من الطول والاتجاه من النقطة المرجعية إلى الجسم.
الموقع الزاوي	Angular Position	كمية تصف اتجاه جسم بالنسبة لاتجاه مرجعي ما.
النطاقات المغنطيسية	Magnetic Domains	مناطق اصطفاف منتظم داخل مادة مغنطيسية.
نظام العدّ الثنائي	Binary	تمثيل رقمي للأعداد بدلالة قوى العدد 2. يُمثّل العدد 6 في النظام الثنائي كـ 110، أي 4 واحدة (2^2)، و 2 واحدة (2^1)، و 0 واحد (2^0).

النظام العشري	Decimal	التمثيل الرقمي للأعداد بدلالة قوى العدد عشرة. يُمثَّل العدد 124 في النظام العشري كـ 124، أي مائة واحدة (102)، وعشرتين (101)، و4 واحد (100).
النظام الفوضوي	Chaotic System	نظام متحرّك شديد الحساسية للشروط الابتدائية. التغيرات الطفيفة لكيفية ترتيب نظام فوضوي قد تؤدي لترتيبات نهائية مختلفة بشكل هائج.
النظائر	Isotopes	ذرات لا يمكن التمييز بينها كيميائيا تحتوي على أنوية تختلف فقط في عدد نيوتروناتها.
النظرية النسبية الخاصة	Special Theory Of Relativity	القوانين الفيزيائية التي تحكم جميع الحركات، بما في ذلك الحركة التي لها سرعة قريبة من سرعة الضوء.
النظرية النسبية العامة	General Theory Of Relativity	القوانين الفيزيائية التي تحكم جميع الحركات، حتى الحركة التي تتضمن سرعات قريبة من سرعة الضوء والتي تحدث في وجود أجسام ضخمة الكتلة.
نفاذية الفراغ	Permeability Of Free Space	الثابت المحدّد الذي يربط بين قطبيين والقوى المغنوستاتيكية التي يبذلانها على بعضها البعض. قيمته الثابتة هي $4\Pi \times 10^{-7}\ N/A^2$.
النفقية	**Tunneling**	بسبب مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، فإن الأجسام الصغيرة لها مواقع غير معرّفة بشكل جيّد، وبعض الأحيان تتحرّك خلال حواجز طاقة لتصل لمواضع لا تستطيع الوصول إليها بالفيزياء التقليدية. هذه العملية الكميّة هي النفقية.
نمط	**Mode**	نمط أساسي من تشوه أو تذبذب.
نمط التداخل	**Interference Pattern**	نمط لتغيّرات الشدة بالنسبة للزمان والمكان يحدث عندما تتراكب موجتان أو أكثر وتواجه تداخلات بنّاءة وهدّامة.
نمط اهتزاز أساسي	**Fundamental Vibrational Mode**	أبطأ وفي الغالب أعرض اهتزاز يمكن أن يدعمه جسم ممتد.
النواة	**Nucleus**	عنصر الذرة المركزي المشحون بشحنة موجبة، ويحتوي على معظم كتلة الذرة وتترتب الإلكترونات حولها. جمعها أنوية.
نوكليون	Nucleon	اسم عام يُعطى للجسيمات التي تكوّن الأنوية الذرية: البروتونات والنيوترونات.
نيوترون	Neutrons	جسيم دون ذري متعادل كهربائيا، يكوّن الأنوية سوية مع البروتونات.
نيوترينو	Neutrinos	جسيمات عديمة الشحنة وتقريبا عديمة الكتلة تنشأ أثناء الاضمحلالات الإشعاعية وأحداث نووية أخرى. نادراً ما تتفاعل مع المادة.
نيوتن - لكل - أمبير · متر (N/A·M)	Newton-Per-Ampere·M (N/A·M)	وحدة المجال المغنطيسي في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لتسلا).
نيوتن - لكل - كولوم (N/C)	Newton-Per-Coulomb (N/C)	وحدة المجال الكهربائي في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لفولت - لكل - متر).
نيوتن - لكل - متر^2	Newton-Per-Meter^2 (N/M^2)	وحدة الضغط في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لباسكال).
نيوتن (N)	**Newton (N)**	وحدة القوة في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لكيلوجرام · متر - لكل - ثانية^2). ثمانية عشر كوارت أمريكي لها وزن يساوي تقريبا 1 نيوتن. الوحدة البريطانية المألوفة للقوة، وهي رطل - قوة، هي حوالي 4.45 نيوتن.
نيوتن· متر Newton-Meter	(N·M)	وحدة الطاقة والشغل في النظام العالمي للوحدات Si (مرادف لجول). كما أنها وحدة العزم الدوراني في نفس النظام، المبذول من قوة مقدارها 1 نيوتن تقع على بُعد 1 متر عن محور الدوران. واحد نيوتن · متر هو تقريبا العزم الدوراني المبذول على كتفك من قِبل وزن كرة بيسبول في ذراعك الممتدة.
هبوط فولطي	Voltage Drop	مقدار الطاقة الكهروستاتيكية الكامنة التي يفقدها كل كولوم من الشحنة الموجبة أثناء مروره في جهاز. وهو يساوي فولطية الشحنات الداخلة إلى الجهاز مطروحا منها فولطية الشحنات المغادرة للجهاز.
هنري (H)	Henry (H)	وحدة المحاثة في النظام العالمي Si. الملف الحثّي الذي مقداره 1 هنري سيواجه تغيّراً مقداره 1 أمبير في التيار المتدفّق خلاله في كل ثانية عندما يتعرّض لهبوط فولطي مقداره 1 فولت.
هيرتز Hertz (Hz)	(Hz)	وحدة التردد في النظام العالمي Si (مرادف لدورة - لكل - ثانية).
واط (W)	Watt (W)	وحدة القدرة في النظام العالمي للوحدات Si، وهي تساوي نقل 1 جول - لكل - ثانية.

		واحد واط هو القدرة المستخدمة من قِبل مصباح اعتيادي في كشّاف ضوئي.
الوحدات القياسية	Standard Units	مقادير متفق عليها لكميّات فيزيائية متعددة، والتي تعرّف نظاماً تُقاس فيه هذه الكميّات فيما بعد.
وحدات النظام البريطاني	English System Of Units	تشكيلة من الوحدات العتيقة التي كانت تُستخدم في المستعمرات الانجليزية والتي مازالت تُستخدم في الولايات المتحدة اليوم. من ضمن وحدات هذا النظام القدم والأونس والميل -لكل - ساعة.
وحدات النظام العالمي Si	Si Units	نظام وحدات يُعرّف بعناية الوحدات ذات العلاقة وفقا لقوى العدد 10. تُستخدم وحدات نظام Si وحدها فقط في معظم العالم، باستثناء الولايات المتحدة الأمريكية.
وحدة الشحنة الكهربائية الأولية	Elementary Unit Of Electric Charge	الكمية الأساسية للشحنة الكهربائية، تساوي حوالي $1.6\ C \times 10^{-19}$.
الوزن (قرب سطح الأرض)	Weight	القوة المتجهة للأسفل المبذولة على جسم بسبب تفاعله مع الجاذبية الأرضية. وزن الجسم يساوي حاصل ضرب كتلة الجسم مضروبا في التسارع بسبب الجاذبية. اتجاه الوزن يشير دائما نحو مركز الأرض.
الوزن الظاهري	Apparent Weight	مجموع وزن الإنسان مضافاً إليه إحساسه بالتسارع. هذه الكميّات الثلاثة هي كميّات متجهات، لذا، فإن الوزن الظاهري قد يكون كبيرا جدا إذا كان الوزن والإحساس يشيران في نفس الاتجاه أو صغيرا جدا إذا أشارا في اتجاهين متعاكسين.
الوسط الليزري	Laser Medium	تجمّع من الذرات المثارة أو أنظمة كمّية أخرى قادر على تضخيم الضوء المار عن طريق الانبعاث المستحثّ.
وصلة م – س	P-N Junction	السطح الفاصل بين شبه موصّل نوع – س وشبه موصّل نوع – م والذي يُعطي الدايود خاصيته الأحادية الاتجاه للإلكترونات.

حلول بعض التمارين والمسائل المختارة

الفصل الأول

ت.١ القصور الذاتي للدلفين يحمله للأعلى، حتى وإن كان وزنه يجعله يتسارع للأسفل ويتوقف تدريجياً عن الارتفاع.
ت.٣ تتسارع قدماك للأعلى بسرعة عندما تصطدم بالأرض ويستمر الثلج بالهبوط للأسفل، تاركا قدميك خلفه.
ت.٥ أي تصادم تتسارع فيه السيارة إلى الأمام، مثل اصطدام سيارتك من الخلف من قِبل سيارة سريعة الحركة.
ت.٧ عندما تستدير سيارتك إلى اليسار، فإنها تتسارع إلى اليسار. تظل الأجسام الحرة في مكانها فينتهي بها المطاف على الجانب الأيمن من سطح لوحة العدادات.
ت.٩ تتسارع إلى الخلف، في اتجاه معاكس لسرعتك نـحو الأمام.
ت.١١ كتلة السندان الكبيرة تبطئ من تسارعه، لذا فإن المعدن الساخن ينضغط بين المطرقة المتحركة والسندان الساكن.
ت.١٣ يميل القصور الذاتي للمفكرة على إبقائها في مكانها. إذا سحبت الورقة بسرعة، فإن المفكرة لن تكون قادرة على التسارع مع الورقة.
ت.١٥ بغض النظر عن مركبة سرعتهما الأفقية، فإن جميع الأجسام تسقط بنفس المعدل. تهبط الكرة والرصاصة سوية.
ت.١٧ تظل المركَبة الأمامية لسرعته ثابتة حينما يسقط، ويتّبع الرجل مساراً مقوّسا يحمله إلى الأمام متخطيا الصخور.
ت.١٩ في غياب تأثيرات الهواء، فإن الكرة المضروبة بزاوية 45° فوق الأفق ستسير لأبعد مدى. الكرة التي تُضرب أعلى أو أقل من هذه الزاوية لن تسير نفس البعد.
ت.٢١ مقدار القوة يجب أن يساوي وزن الحقيبة.
ت.٢٣ محصلة قوة صفرية.
ت.٢٥ يبذل رائد الفضاء قوة للأعلى مقدارها 850N على الأرض.
ت.٢٧ كلا القوتين لهما نفس المقدار.
ت.٢٩ يبذل الحائط قوة داعمة لتسريعك للخلف.
ت.٣١ يقوم الإنسان بشغل أكثر. الحركات التي تبدو وكأنها كبيرة مقارنة بارتفاع النملة مازالت تتضمّن مسافات قصيرة وشغلاً قليلاً.
ت.٣٣ نعم، دفعت المطرقة الحائط للداخل وبعجته للداخل.
ت.٣٥ بينما تتدحرج على السطح فإنها تتسارع دائما للأسفل.
ت.٣٧ أعلى تسارع عند الانـحدار الأعلى؛ وأعلى سرعة عند قاع الزلاقة.
ت.٣٩ تصبح الطاقة الحركية طاقة جذب كامنة.
م.١ 3200N
م.٣ 11.13m/s
م.٥ سيكون وزنك على المريخ حوالي 38 ٪ من وزنك على الأرض.
م.٧ حوالي 0.64s (0.32s في الطريق للأعلى و 0.32s في الطريق للأسفل).
م.٩ 48N
م.١١ حوالي 0.2s
م.١٣ 4800N
م.١٥ 9800N
م.١٧ 14,700,000J
م.١٩ 12.5J
م.٢١ 8000N

الفصل الثاني

ت.١ يمكن وصفها بالزاوية التي يجب أن يُدار فيها المقعد الأمامي المركزي، من منظور أعلى، لكي نـحصل على توجيه كل مقعد.
ت.٣ ستدور العجلة حول مركز كتلتها، وليس مركزها الهندسي. ستبدو وكأنها تترنّح حينما تدور.
ت.٥ للعجلة قصور ذاتي دوراني، كما هو مُقاس من كتلتها الدورانية، مما يجعل من الصعب بدء أو إيقاف دورانها.
ت.٧ لا تنتج القوة المبذولة على المفصلات أي عزم دوراني عليها.
ت.٩ كلما بعُد الماء عن نقطة ارتكاز عجلة الماء، زاد العزم الدوراني الذي ينتجه وزنه على العجلة.
ت.١١ تُنتج قوتك المبذولة بعيدا عن المفصلات عزماً دورانياً كبيراً. لمعارضة هذا العزم الدوراني، يجب أن تبذل الجوزة قوة كبيرة بالقرب من المفصلات.

ت.١٣ تبذل أوزان صدرك وقدميك عزمي دوران متعاكسين في الاتجاه حول ركبتيك. يوازن أحدهما الآخر جزئياً.
ت.١٥ يقلل هذا التصميم من الكتلة الدورانية للسيارة بحيث تستطيع السيارة أن تخضع لتسارعات زاوية سريعة وتغيّر اتجاهها بسرعة.
ت.١٧ بالدفع بعيدا عن نقطة الارتكاز، فأنت تبذل عزماً دورانياً أكبر على الغطاء.
ت.١٩ يُنتج جهدك الصغير المبذول على العتلة بعيدا عن نقطة ارتكازها قوة كبيرة على الصندوق، بالقرب من نقطة ارتكاز العتلة.
ت.٢١ يبذل التزحلق جانبيا شغلا ضد الاحتكاك الانزلاقي، فيحوّل جزءاً من الطاقة الحركية للمتزلج إلى طاقة حرارية.
ت.٢٣ يلتف سطح المرقاق مع العجين ولا ينزلق عبره.
ت.٢٥ كلما قربت قوة الاحتكاك من نقطة الارتكاز، قلّ العزم الدوراني الذي تنتجه لتبطئة دوران اليويو. الملاسة تقلل من الاحتكاك.
ت.٢٧ تدفعك قوة الاحتكاك الساكن مع الأرض نـحو الأمام.
ت.٢٩ ضغط العجلات بإحكام أكبر على الأرض تزيد من القوة القصوى التي يبذلها الاحتكاك الساكن على العجلات.
ت.٣١ يواجه الطباشير احتكاكاً انزلاقياً حينما تكتب ويترك خلفه رقائق تالفة مرئية على اللوح.
ت.٣٣ لكي يتجنب الرجل الشرير التسارع عند دفعه بقوة يجب أن يكون له كتلة لانهائية. وهذا مستحيل.
ت.٣٥ كمية الحركة الزاوية.
ت.٣٧ لا يمكن أن تتغير كمية الحركة الزاوية للنجم المسحوق. بما أن كتلته الدورانية تقل، فإن سرعته الزاوية يجب أن تزيد.
ت.٣٩ عندما تهبط، تهبط بقوة وعلى ركبتيك وساقيك أن يحولا طاقتك الحركية إلى طاقة حرارية. يمكن أن تحدث إصابات عند ذلك.
ت.٤١ يحوّل الاحتكاك الانزلاقي بعضا من طاقة جذبهم الكامنة إلى حرارة، لكن القضيب الزلق يحوّل جزءاً لا بأس به من هذه الطاقة إلى طاقة حركية.
م.١ حوالي 122.5N·m إلى اليسار.
م.٣ ثلاثة أضعاف العزم الدوراني.
م.٥ 12.5N·m، يُبطئ الشفرة.
م.٧ ستكون طاقتها فقط 0.2 مرة من قيمتها السابقة.
م.٩ 2400 kg·m/s نـحو الأمام.
م.١١ 3600J
م.١٣ 450kg·m/s نـحو اليمين.

الفصل الثالث

ت.١ عندما تسحب الوتر من شكله المتزن، فإنه يواجه قوة إرجاع تتناسب مع إزاحته.
ت.٣ يدعم الجزء العلوي للخصلة وزنا أكبر من أسفلها.
ت.٥ 15N .
ت.٧ صحيحة.
ت.٩ أنت تدعم ملابسك والميزان يدعمك.
ت.١١ الـ 30% نقص في ارتفاع الارتداد هو 30 % نقص في طاقة الجاذب الكامنة – يساوي الطاقة التي أصبحت طاقة حرارية.
ت.١٣ أنت تقوم بشغل على الرمل عندما تدوس عليه، لكن الرمل لا يرد هذه الطاقة إليك بينما ترفع قدميك للأعلى مرة أخرى.
ت.١٥ زيادة في معامل ارتداد الكرة.
ت.١٧ سرعتك النسبية صغيرة – في إطارك المرجعي فإن السيارة التي أمامك بالكاد تتحرك، لذا فإن التصادم لطيف جدا.
ت.١٩ بما أن السرعة النسبية للقطارين صفر، فإن الشخص الذي يقفز بينهما يراهما في الواقع ساكنين.
ت.٢١ أثناء الارتداد فإن الشغل المبذول على كرة RIF – لتخزين طاقة بها – يتضمّن قوة أصغر مبذولة على مسافة أطول.
ت.٢٣ عند الضغط المرتفع، تُصبح الأحذية أكثر صلابة وتبذل قوى أكبر عند تشوهها. تتسارع بشكل أكبر وترتد بشكل أسرع.
ت.٢٥ ستقل القوة التي تبذلها المطرقة على المسمار أثناء تصادمهما إذا كان سطح المطرق يتشوّه بسهولة.
ت.27 في حين تستطيع الشعور بالتسارع، إلا أنك لا تستطيع الشعور بالسرعة.
ت.29 عندما تتسارع الشخشيخة، فإن الخرزات داخلها تستمر في حركتها وتصطدم بجدران الشخشيخة. عندها تُصدر الشخشيخة صوتا.
ت.٣١ كلما كان الانعطاف أكثر حدة، زادت القوة المركزية التي يحتاجها القطار لكي يتسارع حول المنعطف. إذا لم تستطع مسارات سكة الحديد أن توفر تلك القوة المركزية ستحدث كارثة.
ت.٣٣ يبذل المسمار قوة هائلة على المطرقة لتبطئتها. تدفع المطرقة عكسيا فتُدخل المسمار في الخشب.
ت.٣٥ عند أسفل كل تأرجح.
ت.٣٧ بينما تخضع السلطة لتسارع مركزي كبير، فإن الماء يسير في خطوط مستقيمة ويخرج من السلطة.
ت.٣٩ بعد أن تسير السيارة فوق مطب، فإنها تتسارع للأسفل فيكون وزنك الظاهري أقل من وزنك الحقيقي لفترة وجيزة.
ت.٤١ بينما يتسارع المصعد للأعلى، فإنك يجب أن ترفع الحقيبة بقوة أكبر لجعلها تتسارع للأعلى أيضا.

م.١ 15,000N/m

م.٣ 10mm

م.٥ يجب أن تدور بحوالي 31m/s

م.٧ $20m/s^2$

الفصل الرابع

ت.١ بينما يتسارع العدّاء، يجب على الأرض أن تدفع نـحو مركز كتلة العدّاء لتتجنب بذل عزم دوراني على العدّاء.

ت.٣ تُبقيك قوة الاحتكاك المؤثرة على قدميك والمتجهة نـحو اليسار متزنا.

ت.٥ طالما أن القوة الداخلية من السطح الذي على شكل حرف U تتجه نـحو مركز كتلة لوحة التزلّج، فإن المتزلّج لا يبدأ بالدوران.

ت.٧ عزم الدوران الذي تبذله على الساعد هو أكبر بكثير من العزم الدوراني الذي تبذله الشفرات على الخليط.

ت.٩ في كل ثانية، تدفع الشفرة العجينة لمسافة قصيرة. للقيام بشغل ذي معنى، يجب أن تكون القوة التي تبذلها على العجينة كبيرة.

ت.١١ بينما تدفع النافخة هواء نـحو الأوراق، فإن ذلك الهواء يدفع النافخة بعيدا عن الأوراق.

ت.١٣ هما متكافئان.

ت.١٥ نعم.

ت.١٧ تنقل الكرة كمية حركة بينكما بحيث تكتسب كمية حركة في الاتجاه المعاكس لصديقك.

ت.١٩ نـحو الأرض مباشرة.

ت.٢١ يجب أن يقوم الصاروخ بشغل أقل ضد جاذبية القمر.

ت.٢٣ بما أن الخط من الشمس إلى المذنب يجب أن يمسح مساحات بمعدل ثابت، فكلما اقترب المذنّب من الشمس وجب عليه أن يتقوّس بشكل أسرع حول الشمس.

م.١ حوالي 0.076m/s

م.٣ حوالي 0.00028 ضعف وزنك على الأرض.

م.٥ حوالي 1014N × 4.7

م.٧ 10^{11}kg·m/s × 1.73

م.٩ 10^{-10} × 5.56

م.١١ 10^{-14}kg × 1.1

م.١٣ 1.26

الفصل الخامس

ت.١ سيغوص. كثافته المتوسطة أكبر من كثافة الهيليوم.

ت.٣ حينما يدخل الماء إلى السيارة، فإن كثافة السيارة المتوسطة ستزيد.

ت.٥ السائل العلوي له كثافة أقل من السائل السفلي. لذا، فهو يطفو.

ت.٧ 1 كيلوجرام من البنزين يأخذ حيزا أكبر من 1 كيلوجرام من الماء.

ت.٩ قوة للأعلى مساوية في المقدار لوزن السمكة.

ت.١١ يتناقص ضغط الهواء بمعدل ثابت مع زيادة الارتفاع.

ت.١٣ يُمسك ضغط الهواء بالنقرة إلى الداخل عندما يوجد داخل الجرة تفريغ هوائي، لكن يختفي الفرق في الضغط عند فتح الجرّة.

ت.١٥ تبريد الهواء الموجود في الوعاء قلل من ضغطه. عدم التوازن الضغطي الناتج على جانبي الغطاء يدفع به نـحو الداخل.

ت.١٧ عندما ازدادت برودته أصبح أكثر كثافة.

ت.١٩ تُنتج زيادة الضغط داخل البخاخ مسافات أكبر من الرشّ. بالنسبة للاتجاه، لن يسير الرشّ لمسافات أكبر عندما يكون رأسيا للأعلى لأن بعض طاقته الحركية ستصبح طاقة جذب كامنة في طريقه للأعلى.

ت.٢١ عدم التوازن الضغطي في قاعدة السد أكبر.

ت.٢٣ الضغط خارج رئتيك هو أعلى من الضغط الجوّي.

ت.٢٥ يتسارع الغاز فقط نـحو الضغط المنخفض.

ت.٢٧ بينما تتباطأ الرياح داخل الكيس، فإن ضغطها يرتفع وتنفخ الكيس.

م.١ 101,400Pa

م.3 ثلاثة أضعاف القيمة الأولى.

م.٥ ٠,٩٤ مرة من ذي قبل.

م.٧ 122.4kg أو 0.1224m³
م.٩ 28.4N
م.١١ حوالي 250,000Pa فوق الضغط الجوّي.
م.١٣ 141m/s أو 510km/h
م.١٥ حوالي 3,100,000Pa

الفصل السادس

ت.١ تتطلب زيادة التدفق في أنبوب الماء البارد فرقاً ضغطياً أعلى فيه، فلا يظل سوى ضغط قليل لا يكفي لتشغيل المروش.
ت.٣ التدفق خلال الشرايين مرتبط بالأس الرابع لنصف قطرها.
ت.٥ في الطقس الساخن يكون لجزيئات سائل لزج طاقة حرارية أكبر فتكون قادرة على التحرك مرورا ببعضها البعض بسهولة أكبر.
ت.٧ يتطلّب ضغط كريمة عالية اللزوجة من «أنبوب» ضيّق فرقاً ضغطياً هائلاً عبر ذلك الأنبوب.
ت.٩ يتباطأ الهواء القريب من سطح الجسر الساكن بفعل قوى اللزوجة، مكوّنا بذلك طبقة حديّة تتحرك ببطء.
ت.١١ يرتفع الضغط عند قاع الوعاء فجأة بفعل مطرقة الماء. يهبط الضغط عند قمة الوعاء أو يظل كما هو.
ت.١٣ في التدفق الاضطرابي، تُصبح المناطق المتجاورة في الماء متباعدة.
ت.١٥ يوقف الدلو الماء، فيرتفع ضغطه. الضغط المرتفع فوق الدلو يدفعه بقوة للأسفل.
ت.١٧ يتباطأ الماء مع التيار وضد التيار بعيدا عن الدعامات وتزيد سرعته على جانبي الدعامات.
ت.١٩ الكرة التي لها نقرات ستصطدم أولاً.
ت.٢١ العدّاء الأمامي يدفع الهواء نحو الأمام بحيث أنك تواجه مقاومة هواء أقل حينما تركض خلال الهواء المتحرّك نحو الأمام.
ت.٢٣ لتوازن القوة نحو الخلف التي تسببها مقاومة الهواء.
ت.٢٥ كلا الجسمين يتباطآن بمقاومات ضغطية متشابهة. لكن كتلة الرمح وكمية حركته الكبيرة تعيقه من التباطؤ بشكل سريع.
ت.٢٧ تزيد المظلة من مقاومة الضغط وتقلل سرعتك النهائية.
ت.٢٩ سيكون السطح الانسيابي الدائري من الأمام والمستدق في الخلف أفضل.
ت.٣١ يدعم رفع الماء المتزلج للأعلى وتسحبه المقاومة للخلف.
ت.٣٣ بدون دوران، لا يمكن أن تتحصّل الكرة على رفع ولن تقطع مسافة طويلة.
ت.٣٥ تنتج الاضطرابات الصغيرة في تدفق الهواء حول جوانب الكرة غير الملتفة قوى رفع تدفع الكرة جانبا.
ت.٣٧ سرعة الماء تزيد عند المنحنى وينخفض ضغطه. يدفع الاختلال الناتج في توازن الضغط الملعقة نحو التيار.
ت.٣٩ يسير الهواء بسرعة أكبر فوق يدك مقارنة بتحتها، لذا فإن الضغط فوق يدك أقل من الضغط تحتها.
ت.٤١ تتكوّن جيوب من الهواء المضطرب خلف ريشها المتحرّكة، لذا تتدفق دوامات وتيارات دائرية من المروحة.
م.١ بالنسبة لسمكة طولها المسبب للإعاقة (أي عرضها) هو 2cm تقريبا، سيظهر اضطراب إذا تحركت بسرعة أعلى من حوالي 0.1m/s
م.٣ حوالي أطول بـ 84 مرة.
م.٥ حوالي 400,000Pa
م.٧ حوالي 18.3m/s

الفصل السابع

ت.١ ستنخفض درجة حرارة جسمك.
ت.٣ من الشغل الذي تقوم به في دفع العجين في اتجاه حركته.
ت.٥ الأطعمة هي موصلات رديئة للحرارة. تحمل الأسياخ المعدنية الحرارة بشكل أفضل.
ت.٧ يسمح الشبك للحمل بحمل الهواء للأعلى مارا بالخشب.
ت.٩ ترتفع الحرارة نتيجة الحمل وتُشعِل باقي العود.
ت.١١ الأسود هو أفضل باعث للإشعاع الحراري، بينما الأبيض والفضي باعثات رديئة.
ت.١٣ تتسامى المادة الصلبة وتُصبح جزيئاتها غازات.
ت.١٥ الجليد أبرد من درجة حرارة ذوبانه ويجب أن يسخن قبل أن يبدأ بالذوبان.
ت.١٧ يحبس الكيس بخارا بحيث ترتفع الرطوبة إلى أن تصل 100% ويتوقف التبخّر.
ت.١٩ تذهب الطاقة الحرارية إلى الحرارة الكامنة لذوبان الجليد.

ت.٢١ سيزيل الماء المغلي الحرارة بسرعة كافية لحماية القدر.
ت.٢٣ يمنع الغطاء التبخّر من تبريد الماء.
ت.٢٥ يغلي الماء عند درجة حرارة أقل في مدينة دنفر.
ت.٢٧ أي شيء يذوب في الماء يحافظ على توازنه فيجد الماء صعوبة في التجمّد أو التبخر.
ت.٢٩ تترك المواد الكيميائية المختلفة العطر السائل بمعدلات مختلفة، لذا فإن بعضها تغادر العطر قبل غيرها. ودرجة حرارة الجلد المرتفعة تحفّز التبخّر، حتى في المواد الكيميائية التي تغادر ببطء.
ت.٣١ من لون ضوئه؛ الأكثر بياضا أكثر سخونة.
ت.٣٣ كلما برُد الجسم، طال الطول الموجي لطيفه الأسود. يبلغ طيف جسم بارد جدا ذروته في منطقة المايكروويف في الطيف الكهرومغنطيسي.
ت.٣٥ في المصباح ذي الثلاث مستويات، تكون أي فتيلة تعمل عند أقصى درجة حرارية. تعمل فتيلة المصباح الخافتة عند درجة حرارة أقل من درجتها القصوى.
ت.٣٧ يبعث الجلد البارد أشعة تحت حمراء خافتة لها أطوال موجية طويلة.
ت.٣٩ للرصيف معامل تمدّد حجمي مختلف عن معامل الأرض وسينكسر إذا تغيرت درجة الحرارة.
ت.٤١ الغطاء المعدني له معامل تمدّد حجمي أكبر من معامل زجاج البرطمان، فينسحب من عن البرطمان عند تسخينهما معا.
م.١ 18,800W
م.٣ 73,500,000W
م.٥ تتناسب كمية الحرارة المنبعثة مع مساحة السطح الباعث. إذا ضاعفت مساحة السطح فإن الحرارة المنبعثة ستتضاعف.

الفصل الثامن

ت.١ البرادات هي مضخات حرارية وتنقل الحرارة إلى الهواء المحيط.
ت.٣ بدون المروحة لن يتمكّن مكيّف الهواء من نقل الحرارة الفائضة إلى الهواء الخارجي. سوف يتوقف عن ضخ الحرارة.
ت.٥ زادت درجة حرارته. بذلت الجاذبية شغلا على الغاز، وظهر هذا الشغل في الغاز على هيئة طاقة حرارية. أصبح الغاز ساخنا.
ت.٧ يقوم الغاز الذي ما يزال موجودا في الوعاء بشغل في دفع الغاز الآخر إلى داخل السدّادة ويستخدم بعضا من طاقته الحرارية في ذلك، فيبرد الوعاء.
ت.٩ على الرغم من أنه ليس ممنوعاً وفق قوانين الحركة، إلا أنه من غير المحتمل جدا أن شظايا المزهرية ستعيد تركيب ذاتها.
ت.١١ هذا التوزيع غير المتساوي للطاقات الحرارية غير محتمل جدا. فهو سيعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية.
ت.١٣ على الرغم من أنه ليس ممنوعاً وفق قوانين الحركة، إلا أن مثل هذه التوزيعات غير المتساوية للثلج غير محتملة جدا.
ت.١٥ تسمح الحرارة المتدفقة من وإلى الأرصفة أثناء تغيّر الطقس لهذه الأرصفة ببذل شغل بينما تتلف وتكسر ذاتها.
ت.١٧ بينما تتدفق الحرارة من البقع الساخنة إلى البقع الباردة، عن طريق خلايا الحمل الضخمة، فإن بعض الحرارة تُصبح طاقة حركية منتظمة.
ت.١٩ بدون اختلاف في درجات الحرارة، لن تتدفق الحرارة طبيعيا. مثل تدفق الحرارة هذا هو الذي يشغّل محركا حراريا مثل الرياح.
ت.٢١ كلما كانت درجة حرارة الغاز المحترق أكبر، زادت نسبة الحرارة التي يمكنها أن تتحوّل إلى شغل بينما تتدفق إلى الهواء الخارجي.
ت.٢٣ تحويل الوقود المحترق بأكمله إلى شغل سيعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية.
م.١ 4190J
م.٣ 0.77°C
م.٥ 1000J
م.٧ 1000J
م.٩ 40J
م.١١ 400J
م.١٣ يمكن لـ 95 % من الحرارة أن تصبح شغلا.

الفصل التاسع

ت.١ ستتحرك بشكل بطيء.
ت.٣ سيقل الزمن الدوري بينما يقصر طول البندول.
ت.٥ ادفعها أثناء انثنائها بعيدا عنك (بحيث تبذل شغلاً عليها).
ت.٧ بضرب زمن رحلة الصوت ذهابا وإيابا بسرعة الصوت سينتج ضعف بُعد الجدار.
ت.٩ تقليل الكتلة، أو زيادة التوتر، أو تقصير الطول.
ت.١١ التفاف النحاس سيضيف كتلة للوتر لخفض النغمة.
ت.١٣ القضبان الأطول لها كتلة مهتزة أكبر وهي أقل صلابة.

ت.١٥ أعمدة هواء الفلوت الصغير نصف طول أعمدة هواء الفلوت العادي، فتهتز عند ضعف النغمة أو واحد ثمان أعلى.

ت.١٧ لا يمكن لماء المحيط أن يدخل أو يغادر البحر الأبيض المتوسط بسرعة كافية للسماح للمد العالي بأن يكون مختلفا كثيراً عن الجزر المنخفض. ببساطة يعيد المد ترتيب مستويات الماء داخل البحر نفسه.

ت.١٩ يحدث انتقال الطاقة الرنيني عندما تتزامن خطواتك مع الحركة التناغمية لتأرجح القهوة في الكوب.

ت.٢١ تتناسب طاقة الموجة مع محيطها وارتفاعها. عند ازدياد المحيط، يجب أن يقل الارتفاع.

ت.٢٣ لا تسير القمم والقيعان على طول الوتر. بدلا من ذلك، يُصبح مركز الوتر قمة وقاعاً بالتناوب.

ت.٢٥ لا يوجد ماء كافٍ أمام الموجات الأكبر لإكمال قممها حينما تمر فوق حاجز الرمل.

ت.٢٧ طولي.

ت.٢٩ لا يمكن للسطح أن يهتز كنصف أو ثُلث أسطح، لذا فإن نغماته الإضافية معقدّة ولا تحدث عند الترددات التوافقية.

ت.٣١ يُبرز السطح الموجات الصوتية بشكل أفضل من الوتر وحده.

ت.٣٣ لا.

ت.٣٥ تنعكس الموجات الصوتية من على السطح الصخري.

ت.٣٧ تنعكس بعض الموجة ولكن تصبح بقية طاقتها طاقة حرارية.

ت.٣٩ يحدث انكسار حينما تتباطأ الموجة فوق الشقوق المرجانية الضحلة.

ت.٤١ يتسبب التداخل بين الموجتين الصوتيتين في حدوث أثر نبضي.

م.١ 3.01m

م.٣ 264m/s

م.٥ 5.2m/s

الفصل العاشر

ت.١ يجب أن تقارن الأجسام بمرجع. الجسم الذي يتنافر مع المرجع سيكون له نفس شحنة المرجع.

ت.٣ لا يمكنك الاستمرار في تقسيم الشحنات إلى أنصاف لأن الشحنة تأتي في وحدات منفصلة، الوحدة الأولية للشحنة الكهربائية.

ت.٥ تستقطب جسيمات الطلاء المشحونة السطح المطلي كهربائيا، بحيث تنجذب جسيمات الطلاء له وتلتصق به.

ت.٧ ستكون قوى الجدار التجاذبية والتنافرية متساوية ولكن متعاكسة، فيصبح محصلة القوى على البالون صفرا.

ت.٩ القطعتان متكافئتان، فتكتسبان نفس الشحنة عند فصلهما عن حاوية الشريط. الشحنات المتشابهة تتنافر.

ت.١١ سيكون للبالون الموجب فولطية أعلى من البالون السالب.

ت.١٣ تتغيّر فولطياتهما. تزيد فولطية البالون الموجب؛ وتقل فولطية البالون السالب.

ت.١٥ تسمح المواد الموصّلة للشحنة بالتدفق وتقلل من طاقتها. ستميل جميع الأشياء نـحو التعادل الكهربائي.

ت.١٧ لكي تتمكّن من تجميع كمية كبيرة من الشحنة، يجب أن لا تكون قادرا على فقدها بسهولة من خلال مسارات موصلة مع الأرض.

ت.١٩ تتناقص القوى بين شحنة كهربائية موجبة والفرشاة مع زيادة المسافة. وبالتالي فإن المجال الكهربائي الذي يؤثر على الشحنة الموجبة يتناقص أيضا مع زيادة المسافة عن الفرشاة.

ت.٢١ البطارية ذات 9V لها التحدّر الفولطي الأكبر وبالتالي المجال الكهربائي الأقوى لأن طرفيها لهما فرق في الفولطية أكبر ومسافة أقصر بينهما.

ت.٢٣ تتنافر الشحنات المتشابهة وتتدفق خلال السيارة الموصلة إلى سطحها الخارجي.

ت.٢٥ إلى الأسفل، بعيدا عن السحابة.

ت.٢٧ تهبط الفولطية وترتفع بسرعة كبيرة نـحو الصفر في محيط النقطة الحادة وهذا التحدّر الفولطي الكبير هو مجال كهربائي قويّ.

ت.٢٩ ستكون السحابة المشحونة فوق رأسك قد حثّت شحنة معاكسة كبيرة لتتدفق من الأرض إلى شعرك.

ت.٣١ في حين يمكن أن تتجمع الشحنة على الطائر، إلا أنها لا يمكنها التدفق كتيار لأنه ليس لها أي مكان آخر تذهب إليه.

ت.٣٣ يدخل التيار من أحد السلكين ويخرج من السلك الآخر.

ت.٣٥ نعم، ستكون البطارية قد فقدت بعضا من الطاقة الكيميائية الكامنة.

ت.٣٧ المسمار المركزي للمقبس له الفولطية الأعلى.

ت.٣٩ يحتوي الصندوق على بطاريات، لأن هناك شيء يوفّر القدرة للتيار.

ت.٤١ القدرة المودعة في المعدن تتناسب مع مقاومته الكهربائية، لذا فإن المعادن ذات المقاومة العالية تسخن أكثر.

م.١ $10^{-9}C \times 3.3$

م.٣ $10^{19}N \times 8.3$

م.٥ 94,800m

م.٧ 0.05N للأعلى.

م.٩ 20N/C (20V/m) مشيرا إلى الأمام.

م.١١ 0.18N نحو الطرف السالب.

م.١٣ 1A

م.١٥ 0.15W

م.١٧ كل بطارية في هذه المسألة توفّر 3W

م.١٩ حوالي 13,333s أو 3.7 ساعة.

م.٢١ 0.05Ω

م.٢٣ 0.6V

م.٢٥ 240,000,000W

م.27 0.05A

م.٢٩ 0.1Ω

م.٣١ 5V

الفصل الحادي عشر

ت.١ لا. لا يوجد أبدا مغنطيسات أحادية القطب، والقوى بين المغنطيسات ثنائية القطب تعتمد على توجيهاتها النسبية.

ت.٣ سترتكز إبرتا البوصلتين بحيث تقلل من طاقتيهما الكامنة الكلية، وعندها سيكون لها أقطاب متعاكسة تشير نحو بعضهما. باصطفافهما ستتجاذبان.

ت.٥ ستكبر النطاقات المصطفة مع المجال الجديد المطبق بينما تصغر النطاقات التي تصطف عكسه.

ت.٧ صفر.

ت.٩ هما متساويان.

ت.١١ تمتد خطوط الفيض المغنطيسي للخارج أكثر من الشريط الذي له ٢ قطب/سنتيمتر.

ت.١٣ ضع المغنطيس في صندوق حديدي. عندها سيوجه الحديد خطوط الفيض المغنطيسي.

ت.١٥ يتناسب الهبوط الفولطي في كل سلك مع التيار.

ت.١٧ سيستهلك 40W.

ت.١٩ يجب أن تتحرك الأقطاب المغنطيسية للبطاقة لتحثّ تيارات في الملف السلكي.

ت.٢١ 20 لفة.

ت.٢٣ V AC 40

ت.25 9A

ت.٢٧ يُسخّن المغنطيس المتذبذب الحلقة عن طريق حثّ تيار داخلها. ينتزع ذلك التيار هذه الطاقة الحرارية من المغنطيس ببذل قوى مغنطيسية عليه والقيام بشغل سالب عليه.

ت.٢٩ كوّن دائرة كهربائية من الملف والبطارية والمفتاح وأغلق الدائرة لبرهة كلما تصل إبرة البوصلة لعكس الاصطفاف مع مجال الملف.

ت.٣١ ستوجّه جميع المغنطيسيات نفسها في الترتيب ذي الأدنى طاقة ولن تتحرك مرة أخرى أبدا.

ت.٣٣ ستتضاعف السرعة الدورانية للدوّار.

ت.٣٥ سيهتز الدوّار ولكنه لن يلتف.

ت.٣٧ يواجه التيار في المجال المغنطيسي قوة لورنتز ويعطف الفتيلة ذهابا وإيابا.

ت.٣٩ يعارض الملف الحثّي التغيرات في التيار ويبطئ من ارتفاع التيار الذي يحدث عندما تغلق المفتاح.

ت.٤١ ستنحرف حزم الإلكترونات نتيجة قوى لورنتز حينما تمر خلال المجالات المغنطيسية الشاردة للمغنطيسات المجاورة.

م.١ 0.1N للأعلى.

م.٣ 1.0T للأعلى.

م.٥ 0.1A·m

م.٧ 0.001J

م.٩ $10^{-6}m^3 \times 2.5$

م.١١ 0.0016T

الفصل الثاني عشر

ت.١ 5000 مستوى.

ت.٣ جميعها ستكون في مستوى الطاقة الأدنى.

ت.٥ ستزيد من الموصلية الكهربائية لشبه الموصّل.

ت.٧ النصف ذو النوع - م له محصلة شحنة سالبة.

ت.٩ الذي له الطبقة العازلة الأكثر سُمكاً.

ت.١١ يزيد الفرق في الفولطية بين اللوحين مع كل انتقال، لذا فإن الطاقة اللازمة لإكمال الانتقال المتتالي ستكون أكبر.

ت.١٣ هناك 6 مئات.

ت.١٥ 219 و 85.

ت.١٧ بدلا من وصف اثنين من العدد ٢، فإن التمثيل الثنائي سيصفه كواحد من العدد 4، الأس التالي لقوى الاثنين.

ت.١٩ يجب أن تكون شحنة البوابة قريبة جدا من القناة بحيث يمكنها أن تجذب شحنة معاكسة وتسحبها إلى القناة.

ت.٢١ عندما يواجه التيار هبوطاً فولطياً حينما يتدفق خلال موسفت، فإن بعضا من طاقته تتحوّل إلى طاقة حرارية.

ت.٢٣ يحتاج الموسفت إلى وقت لتغيير الشحنة على سلك لكي يُخزّن أو يسترجع البت.

ت.٢٥ لا يمكن للميكروفون أن يوفّر قدرة كافية.

ت.٢٧ ينتج الفونوغراف ارتفاعاً فولطياً أصغر من الذي يوفّره مشغّل الـ CD. يتوقع المضخّم فولطية أكبر.

الفصل الثالث عشر

ت.١ ستتذبذب الشحنة في مكثّف وملف حثّ دائرة الحوض.

ت.٣ يحتوي المجال المغنطيسي للملف الحثّي على طاقة، وتصل لقمتها عندما تكون طاقة المكثّف صفرا.

ت.٥ كلما يصل الهوائي لقمة شحنته الموجبة، ادفع العصا الموجبة الشحنة بالقرب منه. ستكون عندها باذلاً شغلاً على الشحنة المتذبذبة.

ت.٧ حينما تتسارع الشحنات في الأسلاك، فإنها تبعث موجات راديو.

ت.٩ حينما تتسارع الشحنات في الكمبيوتر، فإنها تبعث موجات راديو.

ت.١١ تتسارع الشحنات الحلزونية وبالتالي تبعث موجات كهرومغنطيسية.

ت.١٣ استقطاب رأسي.

ت.١٥ تغيّر محطة AM من قدرة إرسالها لكي تُمثّل تذبذبات ضغط الهواء بموجة الراديو.

ت.١٧ يقدّم تعديل السعة ترددات إضافية تمتد إلى 5kHz فوق وتحت تردد حاملة الموجة.

ت.١٩ سيمتص الماء المحبوس في السيراميك موجات المايكروويف، وسيصبح السيراميك ساخنا جدا. يمكنه أيضا أن يتحطّم.

ت.٢١ لن يكون إطلاق موجات المايكروويف في الغرفة صحّياً.

ت.٢٣ يتضمّن كلاهما تداخلاً هدّاماً في الموجات الكهرومغنطيسية.

ت.٢٥ لأنها رقيقة بما يكفي لأن تسخن من التيارات الناتجة ويمكن لأطرافها الحادّة أن تُحدث شرارة.

ت.٢٧ ينعطف مسار الإلكترون الأسرع بتدرّج أكبر، فيسير في دائرة أكبر. يعود الإلكترون لنقطة بدايته في نفس الوقت الذي يعود فيه الإلكترون الأبطأ إلى نقطة بدايته.

م.١ J $10^{-12} \times 4.4$

م.٣ $230{,}000\,m^3$

م.٥ 480,000V/m

م.٧ 0.333m

م.٩ (10^{-6}m×0.461 (461nm

م.١١ Hz $10^{8} \times 8.33$

الفصل الرابع عشر

ت.١ حوالي 160nm.

ت.٣ تحرف استطارة رايلي الضوء الأزرق في جميع الاتجاهات.

ت.٥ ينكسر الضوء عند دخوله وخروجه من الزجاج.

ت.٧ الجسيمات الأكبر تجعل الضوء يستطير أفضل من جزيئات الهواء.

ت.٩ ينعطف الضوء ويتشتت عند الدخول للألماس، وينعكس من السطح الخلفي، وينعطف ويتشتت أكثر عند الخروج من الألماس.

ت.١١ يعكس كل سطح في ذرات السكر بعض الضوء المار خلالها. هذه الانعكاسات العشوائية تجعل السكر يبدو أبيض.

ت.١٣ ينعكس الضوء من السطحين العلوي والسفلي للغشاء الزيتي، ويتداخل الانعكاسان مع بعضهما. يعتمد نوع التداخل على سمك الغشاء والطول الموجي للضوء.

ت.١٥ تمرّر نظاراتهم المستقطبة الضوء المستقطب رأسيا فقط، والتي تحجبها الآن نظارتك الشمسية المستقطبة الملتفّة. لا ترى أي ضوء.

ت.١٧ الأخضر والأزرق.

ت.١٩ طرف الطيف الأخضر والأزرق والبنفسجي.

ت.٢١ أسود.

ت.٢٣ لا يوجد مستوى طاقة أقل يمكنها أن تنتقل إليه، وبينما تظل في الحالة الأرضية فإن إلكتروناتها في موجات موقوفة ولا يمكنها أن تبعث موجات كهرومغنطيسية.

ت.٢٥ لا يحدث شيء لأنه لا يوجد للذرات أي انتقالات إشعاعية يمكنها أن تمتص فوتونات ذلك الضوء.

ت.٢٧ تبعث ذرات الزئبق المثارة ضوءاً فوق بنفسجي غير مرئي في المقام الأول.

ت.٢٩ تنتج ذرات الزئبق ذاتها ضوء الأنبوب فوق البنفسجي.

ت.٣١ تعوّض الفلورة من الجسيمات الساطعة الضوء الأزرق المفقود.

ت.٣٣ فوتونات المصباح جميعها مختلفة ولن تتركّز في نفس البقعة الصغيرة جدا.

ت.٣٥ فوتونات المحطة الإذاعية متطابقة، وهي جزء من موجة واحدة.

ت.٣٧ لأنها ستمتص موجات المايكروويف التي يحاول الميزر أن ينتجها.

ت.٣٩ تمتص أنظمة الحالة الأرضية الكثير من الضوء المضخّم قبل أن يتمكّن من مغادرة الياقوت.

ت.٤١ يعتمد لون الضوء المنبعث من الـ LED أساساً على الفجوة الشريطية في شبه موصّل الـ LED.

م.١ 3.37×10^{-19} J

م.٣ 7.95×10^{-15} J

م.٥ 8.58×10^{31} photon/s

الفصل الخامس عشر

ت.١ هي صورة حقيقية للشمس الدائرية ذاتها.

ت.٣ العدسة ذات 2 ديوبتر لها البُعد البؤري الأقصر.

ت.٥ تُعطي معادلة العدسة بُعداً بؤرياً لها مقداره 0.5cm عندما يكون بُعد الجسم وبُعد الصورة كلاهما 1.0cm.

ت.٧ أعماق تركيزها صغيرة.

ت.٩ للحصول على عدد f مقداره 1.8، يجب أن تكون مكونات العدسة ذات البُعد البؤري 200mm أربعة أضعاف قطر مكونات العدسة ذات البُعد البؤري 50 mm.

ت.١١ تقليص حجم فتحة العين يزيد من عمق تركيزها.

ت.١٣ يكون عمق التركيز أقل ما يمكن عند استخدام العدسة بأكملها.

ت.١٥ زجاج 2 × ذو التكبير الأقل له البُعد البؤري الأطول.

ت.١٧ يمكن تسريع العدسة ذات الكتلة الصغيرة بسرعة من قِبل قوى متواضعة.

ت.١٩ ينعطف الشعاع ليسير بشكل عمودي تقريباً على الحد الفاصل بين الوسطين.

ت.٢١ الحيود يجعل الموجات الضوئية الضيقة تنفرج بشكل كبير.

ت.٢٣ تقلل فتحة العدسة الكبيرة من تأثيرات الحيود.

ت.٢٥ يواجه الضوء انعكاساً كلياً داخلياً داخل الكأس.

ت.٢٧ تتداخل الموجات المنعكسة من الندب والمناطق المستوية تداخلا هدّاما.

م.١ 35mm

م.٣ تتكوّن الصورة الحقيقية للتمثال الأكثر بُعدا في موضع أقرب للعدسة بمقدار 2.2mm

م.٥ 5m

الفصل السادس عشر

ت.١ تحتوي أنوية ذرات ^{65}Cu على نيوترونين إضافيين مقارنة بأنوية ذرات ^{63}Cu.

ت.٣ لا، فإن عدد الإلكترونات يتحدّد بعدد البروتونات.

ت.٥ ستواجه النيوترونات القوة النووية التجاذبية حينما تقلّل من التنافر بين البروتونات.

ت.٧ بوجود عدد أقل من البروتونات، فإن أثر النيوترونات المقلل للتنافر له أهمية أقل.

ت.٩ النيوترون ليس له شحنة ويتفاعل مع الأنوية فقط. الأنوية صغيرة جدا تجعل من الصعب الاصطدام بها.

ت.١١ تضمحل الأنوية الإشعاعية تلقائيا مع الزمن وتصبح المواد أقل ضررا مع الزمن.

ت.١٣ التفاعلات الكيميائية ليس لها أي تأثير على الأنوية.

ت.١٥ يمكن لفوتونات ضوء الشمس أن تُحدث تلفاً كيميائياً.

ت.١٧ يمكن للفوتونات في الضوء الأزرق أو فوق البنفسجي أن تُحدث تلفاً كيميائياً للجزيئات في المخطوطة. في العموم، لا يمكن أن يقوم الضوء الأصفر بذلك.

ت.١٩ تضمحل النظائر المشعّة ذات أعمار النصف الأقصر بسرعة ويمكن انتظار فنائها، بينما النظائر التي لها أعمار النصف الأطول لها احتمال اضمحلال أقل خلال عمر الإنسان.

ت.٢١ إن أي شعاع إكس تقريباً يناسب طاقة أحد إلكترونات الرصاص العديدة وبالتالي يمكنه أن يسبب في انبعاث إلكترون ضوئي بكفاءة.

ت.٢٣ البروتون المضاد له كتلة أكبر من البوزيترون.

ت.٢٥ يكشف الـ MRI الهيدروجين. تحتوي العظام على هيدروجين قليل.

ت.٢٧ كلما كان المجال المغنطيسي أقوى، زادت الطاقة التي يحتاجها البروتون ليتغيّر من الاصطفاف إلى عكس الاصطفاف. يجب أن يكون لفوتونات موجة الراديو طاقة أكبر، لذا يجب أن يكون التردد أعلى.

م.١ تظل 65 ٪ من أنوية ^{67}Ga.

م.٣ تظل 63 ٪ من أنوية ^{99m}Tc .

م.٥ سيضمحل 6.44×10^{-12} بالمائة من الأنوية.